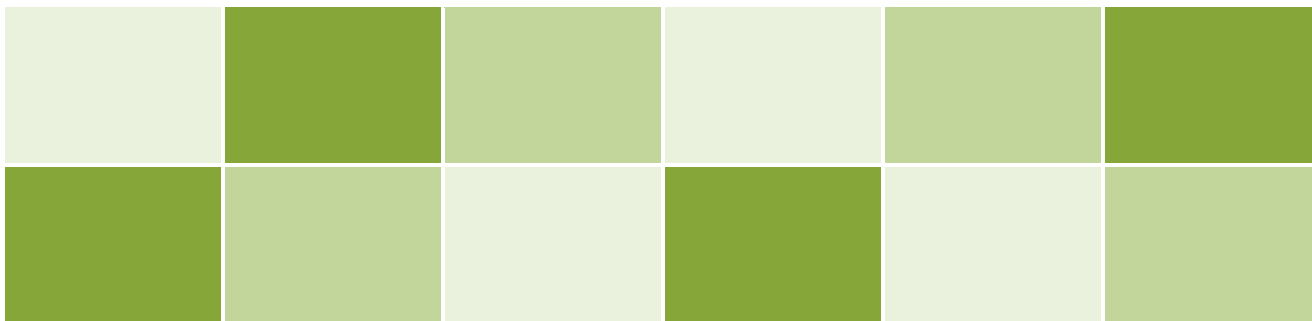


Modelagem Numérica do Transporte e Dispersão da Pluma de Efluentes do Emissário no Porto Norte Capixabda da Manabi Mineração em Linhares - ES



Relatório Técnico – RT-ECV-004/13
Revisão 01 – Outubro/13

Sumário Executivo

A CB&I foi solicitada pela Econservation Estudos e Projetos Ambientais a realizar um estudo de modelagem numérica de circulação hidrodinâmica e dispersão da pluma de emissários hipotéticos em Linhares – ES com o objetivo de sugerir de forma preliminar um ponto ótimo locacional do emissário através da análise do padrão de dispersão da pluma de efluentes lançada em diferentes distâncias da costa, sob diferentes condições meteoceanográficas, com base nas características do efluente a ser despejado.

O modelo Delft3D foi utilizado para avaliação do padrão de dispersão da pluma de efluentes no mar proveniente do emissário submarino. Foram simulados quatro pontos de descarga do emissário, estando cada um desses distanciados da costa em 500, 1000, 1500 e 2000 metros. Para simular o lançamento de efluentes pelo emissário, foi utilizado um traçador conservativo lançado na camada de fundo, com vazão constante de 1211 m³/h nos diferentes pontos locais. Embora o efluente a ser lançado seja tratado, foi utilizado de forma conservadora um efluente com concentração de 50 mg/L. Visto que o efluente será de água doce o modelo foi simulado com transporte de sal, e considerados campos hidrodinâmicos representativos das estações de verão e inverno.

Foram avaliadas as concentrações médias ao longo do tempo de simulação das camadas de superfície e fundo, frequências de ocorrência de concentrações acima de 0,01mg/L e 0,001 mg/L, bem como as séries temporais de concentrações instantâneas em pontos próximos à costa. De forma geral, a pluma do emissário tende a diminuir de dimensão quanto mais distante esse for lançado da costa, deslocando-se no verão para o sul e, durante o inverno, tanto para norte quanto para sul. A diferença de concentrações entre camada de superfície e de fundo foi verificada somente no inverno e observada na análise de frequência de ocorrência de concentrações superiores a 0,001 mg/L: na superfície, a pluma manteve seu sentido bidirecional, enquanto na camada de fundo esse sentido foi para norte, indicando que as correntes de superfície sofrem maiores variabilidades decorrente do efeito do vento. Os maiores valores de concentração nos pontos próximos à costa para o cenário de emissário mais próximo da costa (500 metros) foi de 0,030 mg/L, indicando uma capacidade de diluição de 1:1667. Em decorrência do fato de que o efluente a ser descartado será previamente tratado, o emissário, disposto a 1000 ou a 1500 metros, já seria suficiente para proporcionar um efeito de diluição adequado para poluentes comuns de efluentes domésticos, como o DBO, por exemplo. No entanto, a concentração aceitável do efluente ainda deverá ser avaliada com base nas características dos poluentes e de sua toxicidade ao meio.

SUMÁRIO

SUMÁRIO EXECUTIVO	II
1 INTRODUÇÃO	7
1.1 DESCRIÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	7
1.2 EMISSÁRIOS SUBMARINOS.....	8
1.2.1 ASPECTOS DE QUALIDADE DA ÁGUA.....	8
1.2.2 CUSTOS ENVOLVIDOS.....	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 GRADE NUMÉRICA	19
3.3 BATIMETRIA	21
3.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO	24
3.5 CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	27
3.6 BASES HIDRODINÂMICAS DE VERÃO E INVERNO	28
3.7 MODELAGEM DA PLUMA DE EFLUENTES DO EMISSÁRIO	37
3.7.1 PERÍODO DE VERÃO.....	38
3.7.2. PERÍODO DE INVERNO	46
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
5 REFERÊNCIAS.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo.	10
Figura 2: Localização do ponto (* branco) para o qual foi extraída a série temporal de ventos.	12
Figura 3 Rosa de ventos gerada a partir dos dados do modelo CFSR na coordenada 39°15' O, 19°15' S, para o período entre 2001 e 2012.	13
Figura 4 Constantes de Maré para a estação maregráfica de Barra do Rio Doce - ES.	15
Figura 5: Séries de maré reconstruídas a partir das principais constantes harmônicas da FEMAR para Mucuri e Barra do Rio Doce.	16
Figura 6: Calibração de nível do modelo do Banco de Abrolhos.	17
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.	17
Figura 8: Dados medidos em campo de nível e componente 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.	18
Figura 9: Grade numérica criada para resolver os processos hidrodinâmicos da área de estudo.	20
Figura 10 Cartas náuticas utilizadas para digitalização dos valores de profundidade. Cartas (a) 70, (b) 1400, (c) 22800, (d) 1420.	21
Figura 11: Pontos de batimetria obtidos pelos levantamentos batimétricos efetuados nas proximidades do futuro Porto Norte Capixabda – Linhares - ES. Batimetria composta por levantamento cedido pela empresa Econservation e levantamento efetuado pela Shaw Brasil (dados referenciados verticalmente ao nível zero DHN).	22
Figura 12: Batimetria interpolada e projetada na grade numérica do modelo (dados referenciados verticalmente ao nível médio do mar –N.M.).	23
Figura 13: Calibração do modelo hidrodinâmico correntes e nível.	28
Figura 14: Rosa de ventos gerada com os dados provenientes do NCEP (CFSR) para o período de verão, utilizando dados de janeiro a março de 2011 (19,417° S, 39,15° O).	29
Figura 15: Rosa de ventos gerada com os dados provenientes do NCEP (CFSR) para o período de inverno, utilizando dados de julho a setembro de 2011 (19,417° S, 39,15° O).	30
Figura 16: Direção e intensidades dos dados de vento do NCEP/NOAA extraídos para a região de estudo para o ano de 2009 (bloco laranja indica os meses de verão).	31
Figura 17: Direção e intensidades dos dados de vento do NCEP/NOAA extraídos para a região de estudo para o ano de 2011 (bloco vermelho indica os meses de verão e bloco azul indica os meses de inverno).	32

Figura 18: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no inverno com vento Sudeste e maré enchente de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.	33
Figura 19: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no inverno com vento Sudeste e maré vazante de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.	33
Figura 20: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no verão com vento Nordeste e maré enchente de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.	34
Figura 21: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no verão com vento Nordeste e maré vazante de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.	34
Figura 22: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no inverno com vento Sul e maré enchente de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.	35
Figura 23: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no inverno com vento Sul e maré vazante de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.	35
Figura 24: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no verão com vento Norte e maré enchente de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.	36
Figura 25: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no verão com vento Norte e maré vazante de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.	36
Figura 26: Localização dos quatro pontos de descarte simulados. A distância é indicada em cada ponto.	37
Figura 27: Concentração média (mg/L) do traçador conservativo nas camadas de superfície (figuras acima) e fundo (figuras abaixo) lançado a 500, 1000, 1500 e 2000 metros da costa no período de verão.....	39
Figura 28: Frequência de ocorrência (%) das concentrações superiores a 0,01 mg/L do traçador conservativo nas camadas de superfície (figuras acima) e fundo (figuras abaixo) lançado a 500, 1000, 1500 e 2000 metros da costa no período de verão.....	41
Figura 29: Frequência de ocorrência (%) das concentrações superiores a 0,001 mg/L do traçador conservativo nas camadas de superfície (figuras acima) e fundo (figuras abaixo) lançado a 500, 1000, 1500 e 2000 metros da costa no período de verão.	42
Figura 30: Localização dos pontos para avaliação das concentrações instantâneas.	43

Figura 31: Perfis de concentração do traçador conservativo ao longo do tempo para os emissários a 500 e 2000 metros da costa no período de verão.	45
Figura 32: Concentração média (mg /L) do traçador conservativo nas camadas de superfície (figuras acima) e fundo (figuras abaixo) lançado a 500, 1000, 1500 e 2000 metros da costa no período de inverno.....	47
Figura 33: Frequência de ocorrência (%) das concentrações superiores a 0,01 mg/L do traçador conservativo nas camadas de superfície (figuras acima) e fundo (figuras abaixo) lançado a 500, 1000, 1500 e 2000 metros da costa no período de inverno.	49
Figura 34: Frequência de ocorrência (%) das concentrações superiores a 0,001 mg/L do traçador conservativo nas camadas de superfície (figuras acima) e fundo (figuras abaixo) lançado a 500, 1000, 1500 e 2000 metros da costa no período de inverno.	50
Figura 35: Localização dos pontos para avaliação das concentrações instantâneas.	51
Figura 36: Perfis de concentração do traçador conservativo ao longo do tempo para os emissários a 500 e 2000 metros da costa no período de inverno.	53

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.	22
Tabela 3: Estações aplicadas no presente estudo.	25
Tabela 4: Médias mensais de longo período, desvio padrão e coeficiente de variação. Em evidência, os dados de janeiro a março utilizado para os meses de verão, e de junho a agosto utilizado para os meses de inverno.....	26
Tabela 5: Parâmetros de calibração do modelo hidrodinâmico.....	27
Tabela 6: Profundidade (DHN) em que está localizado cada ponto de descarte.	37

1 Introdução

A CB&I foi solicitada pela Econservation Estudos e Projetos Ambientais a realizar um estudo de modelagem numérica de circulação hidrodinâmica e dispersão da pluma de efluentes lançados de emissários hipotéticos nas proximidades do Porto Norte Capixabda da Manabi Mineração em Linhares – ES. O estudo tem como objetivo sugerir de forma preliminar um ponto ótimo locacional do emissário através da análise do padrão de dispersão da pluma de efluentes lançada em diferentes distâncias da costa, sob diferentes condições meteoceanográficas, com base nas características do efluente a se despejado.

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. Na zona de surfe os sedimentos são predominantemente arenosos.

1.2 EMISSÁRIOS SUBMARINOS

Um esquema típico de disposição de efluentes por emissário consiste de uma estação de tratamento, do emissário propriamente dito, que pode ser em forma de túnel, tubulação, ou combinação dos dois, e de um difusor na extremidade para misturar de forma eficiente o efluente no corpo de água receptor. Desta forma, o sistema de disposição é composto pelo sistema de tratamento e bombeamento, emissário, difusor e a região em torno do difusor, conhecida como campo próximo, onde ocorre a mistura e diluição do efluente de forma rápida.

No campo próximo, o efluente, com densidade menor que a do meio, é lançado com uma velocidade inicial em forma de jato, de forma que a dispersão e diluição são ocasionadas principalmente pela resultante entre a força ascensional decorrente da diferença de densidade do efluente em relação ao meio (empuxo), e a quantidade de movimento do efluente na saída do difusor (dispersão inicial). Na região mais distante do ponto de lançamento, ou campo afastado, a pluma de efluentes tem sua velocidade reduzida e obtém maior densidade, e, por conseguinte a dispersão da pluma passa a ser governada, sobretudo pelas forças horizontais das correntes marinhas (dispersão horizontal). Em caso de lançamento de efluentes domésticos, ao longo do tempo em que o efluente é lançado, o efeito adverso do meio, principalmente decorrente radiação solar, salinidade e da ação de predadores naturais desencadeará o processo de decaimento bacteriano.

O sistema de disposição objetiva promover o tratamento do efluente através do uso de processos naturais de diluição, dispersão e assimilação de forma segura, econômica e confiável, com mínimos impactos ao meio ambiente, sem prejudicar o ecossistema local e a saúde pública.

1.2.1 Aspectos de Qualidade da Água

A fim de se evitar alterações na qualidade da água, é necessário que:

- As concentrações de elementos patogênicos, substâncias tóxicas e contaminantes sejam reduzidas a níveis seguros;
- Concentrações de poluentes orgânicos, nutrientes e oxigênio dissolvido sejam mantidas em níveis admissíveis;
- Deposição reduzida de material particulado;
- O campo de despejo não deve ser avistado na superfície.

No caso de efluentes compostos por metais pesados, óleos e graxas, e poluentes químicos industriais, cuidados especiais devem ser tomados anteriormente ao despejo, na fase de tratamento.

O artigo 22 da Resolução 430/2011 dispõe que o lançamento de esgotos sanitários por meio de emissários submarinos deve atender aos padrões da classe do corpo receptor, após o limite da zona de mistura e ao padrão de balneabilidade, de acordo com as normas e legislação vigentes.

Este lançamento deve ser precedido de tratamento que garanta o atendimento das seguintes condições e padrões específicos, sem prejuízo de outras exigências cabíveis:

I - pH entre 5 e 9;

II - temperatura: inferior a 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura;

III - após desarenação;

IV - sólidos grosseiros e materiais flutuantes: virtualmente ausentes;

V - sólidos em suspensão totais: eficiência mínima de remoção de 20%, após desarenação.

A disposição de efluentes por emissário submarino em desacordo com as condições e padrões de lançamento estabelecidos nesta Resolução poderá ser autorizada pelo órgão ambiental competente, sendo que o estudo ambiental deverá conter no mínimo:

I - As condições e padrões específicos na entrada do emissário;

II - O estudo de dispersão na zona de mistura, com dois cenários:

a) primeiro cenário: atendimento aos valores preconizados na Tabela I desta Resolução;

b) segundo cenário: condições e padrões propostos pelo empreendedor; e

III - Programa de monitoramento ambiental.

1.2.2 Custos Envolvidos

Entre os custos de construção do emissário, incluem o projeto, estudos de campo, a construção, operação, monitoramento e manutenção, sendo que custos de materiais e construção representam normalmente 90% dos custos totais.

Emissários variam tipicamente de 1 a 4 km de extensão com descargas em profundidades de 10 a 70 metros. Em geral, o comprimento do emissário diminui conforme aumento da profundidade.

Custos de emissários variam largamente dependendo do comprimento, diâmetro, profundidade, material, método construtivo e condições locais. Alguns custos são independentes do comprimento do emissário, tais como custos de mobilização e desmobilização e a construção através da zona de surf pode ser a fase mais onerosa. Portanto, o custo por metro dos emissários geralmente decrescem com o aumento do comprimento.

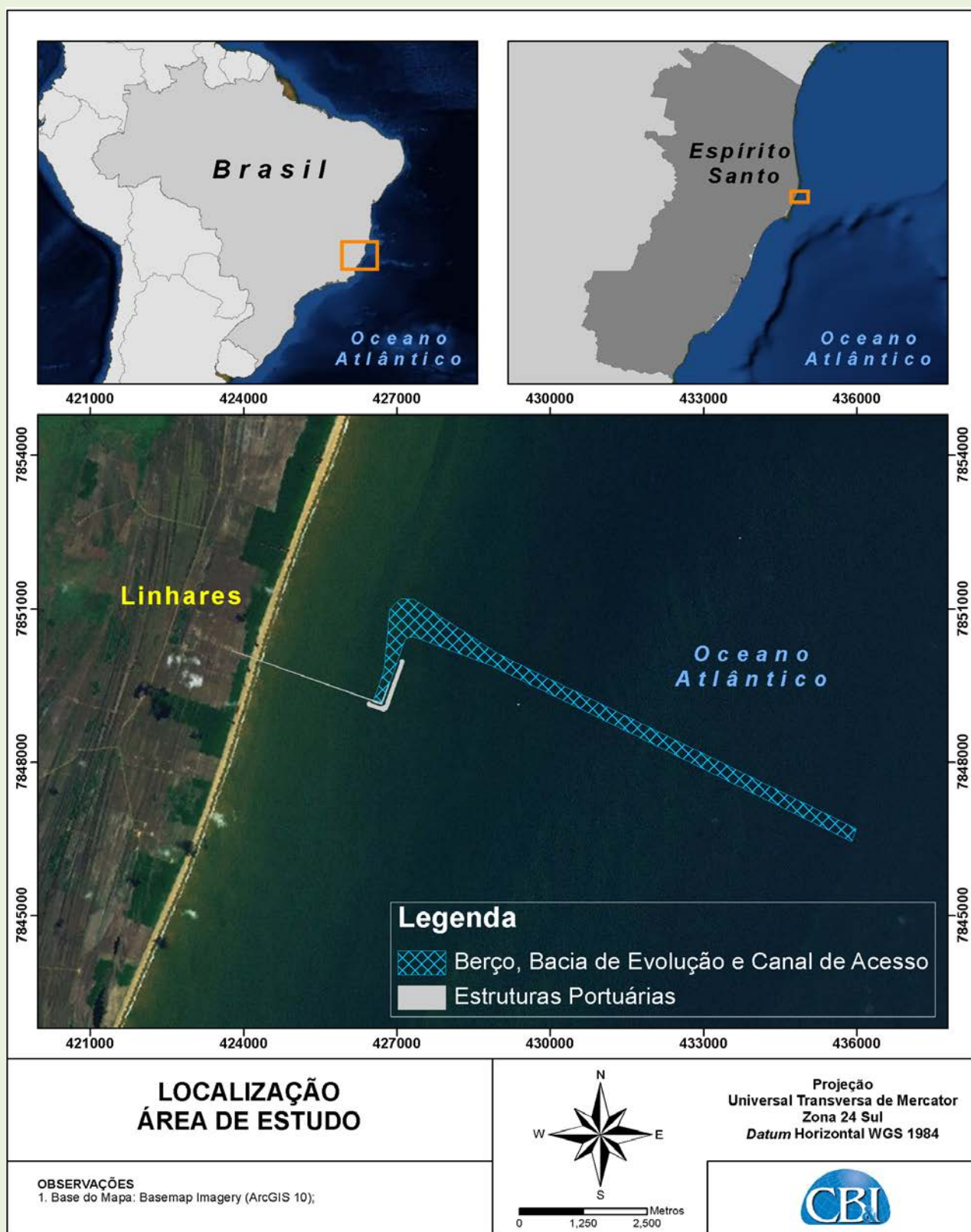


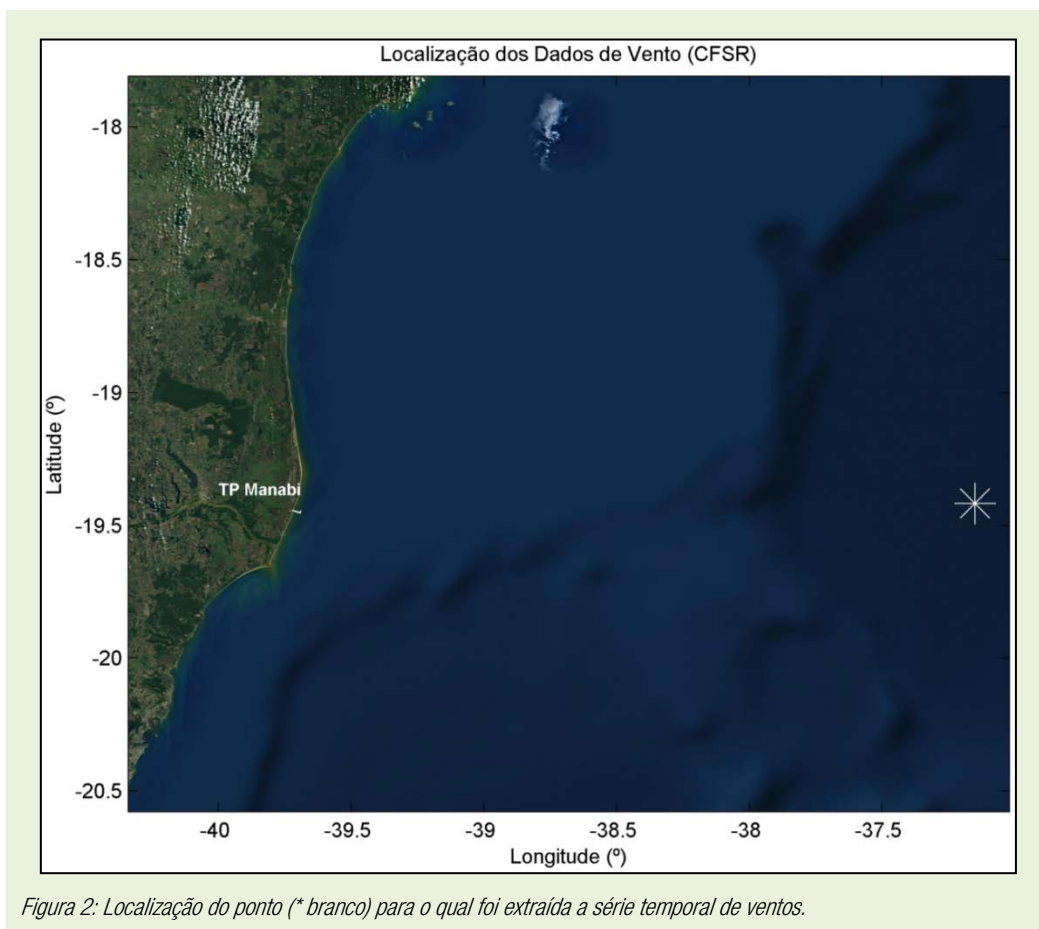
Figura 1: Localização da área de estudo.

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°15'O, 19°15'S (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).



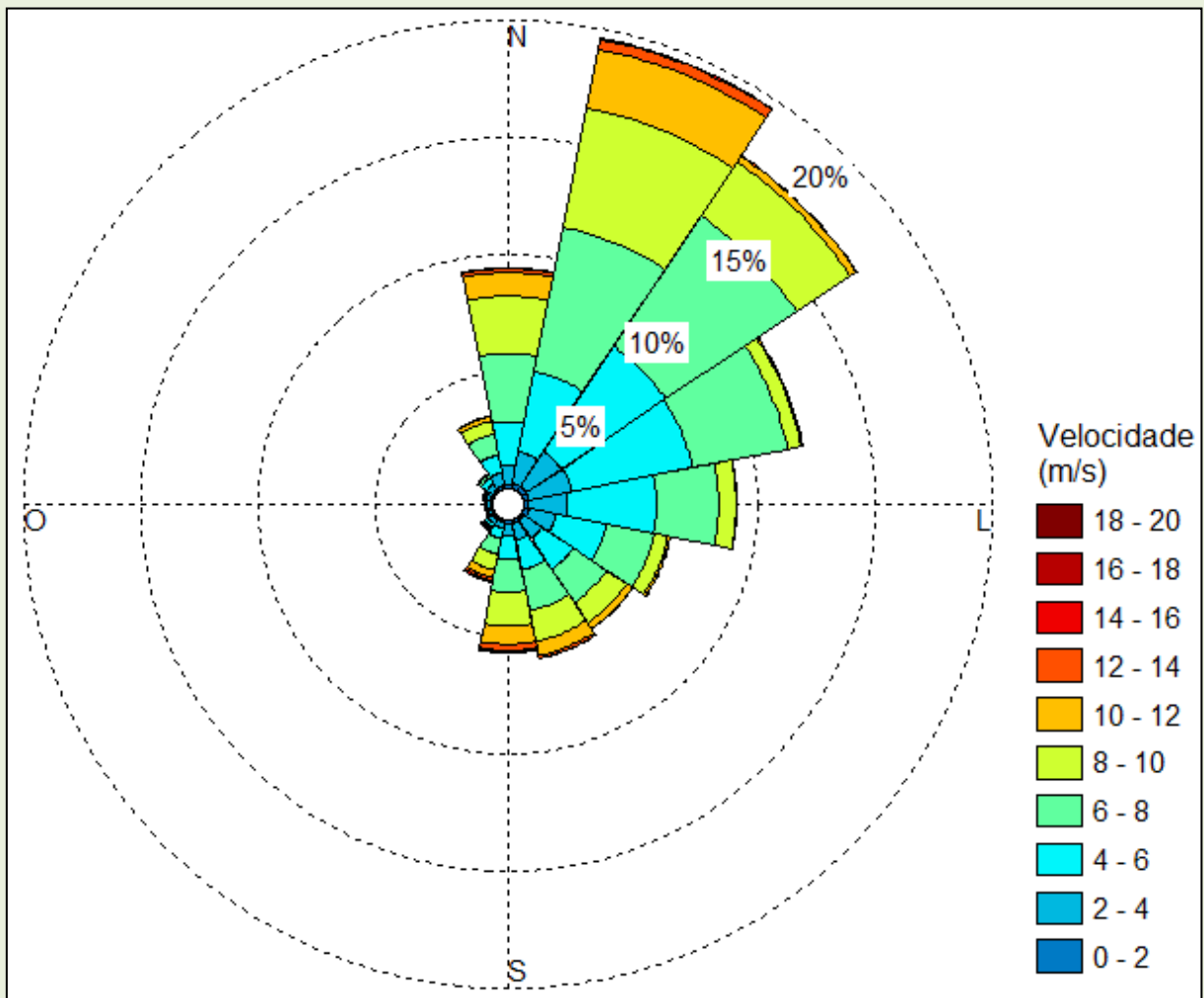


Figura 3 Rosa de ventos gerada a partir dos dados do modelo CFSR na coordenada 39°15' O, 19°15' S, para o período entre 2001 e 2012.

Quadro 1: Diagrama de distribuição de ocorrência 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 semidiurna, 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.

2.2.1 Banco de Abrolhos e Propagação da Onda de Maré

A plataforma continental do litoral do Espírito Santo e Sul da Bahia apresenta recortes diferentes de qualquer outro local no 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 onda de maré. Estes efeitos estão registrados nas fichas das estações maregráficas disponibilizadas pelo instituto FEMAR para Mucuri (região central do banco) e Barra do rio Doce (extremo Sul), mostradas na Tabela 1. 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

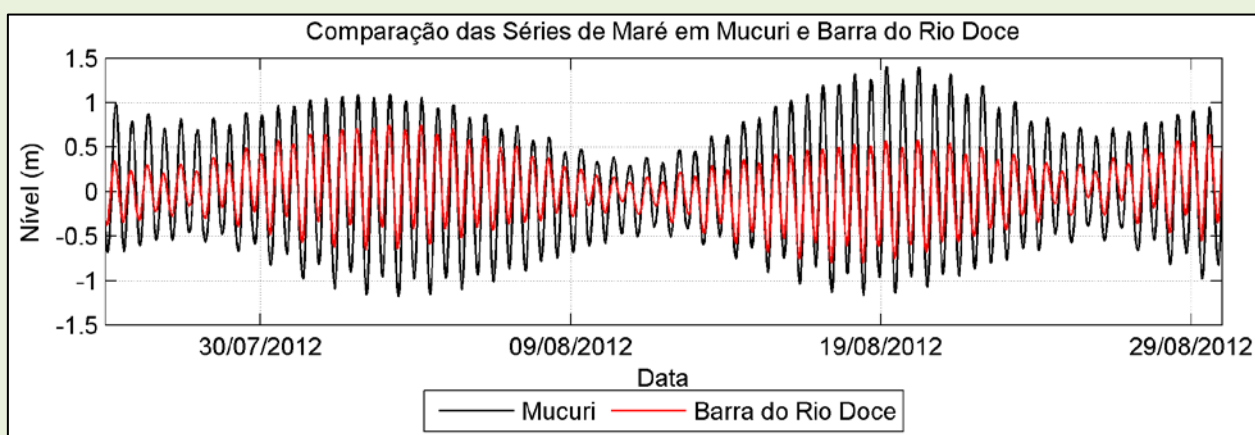


Figura 5: Séries de maré reconstruídas a partir das principais constantes harmônicas da FEMAR para Mucuri e Barra do Rio Doce.

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 lâmina d'água 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.

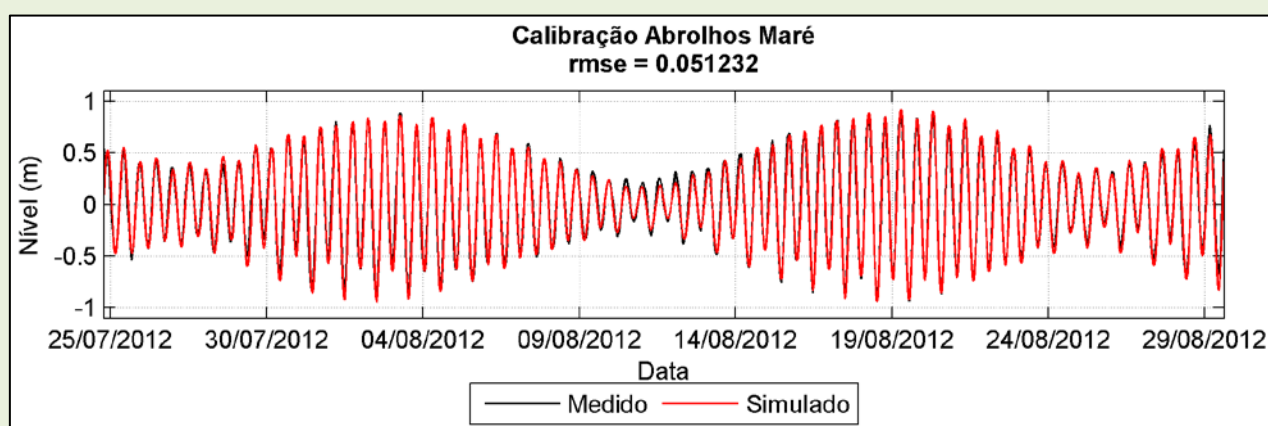


Figura 6: Calibração de nível do modelo do Banco de Abrolhos.

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 ao principal agente gerador das correntes ao longo da costa em Linhares.

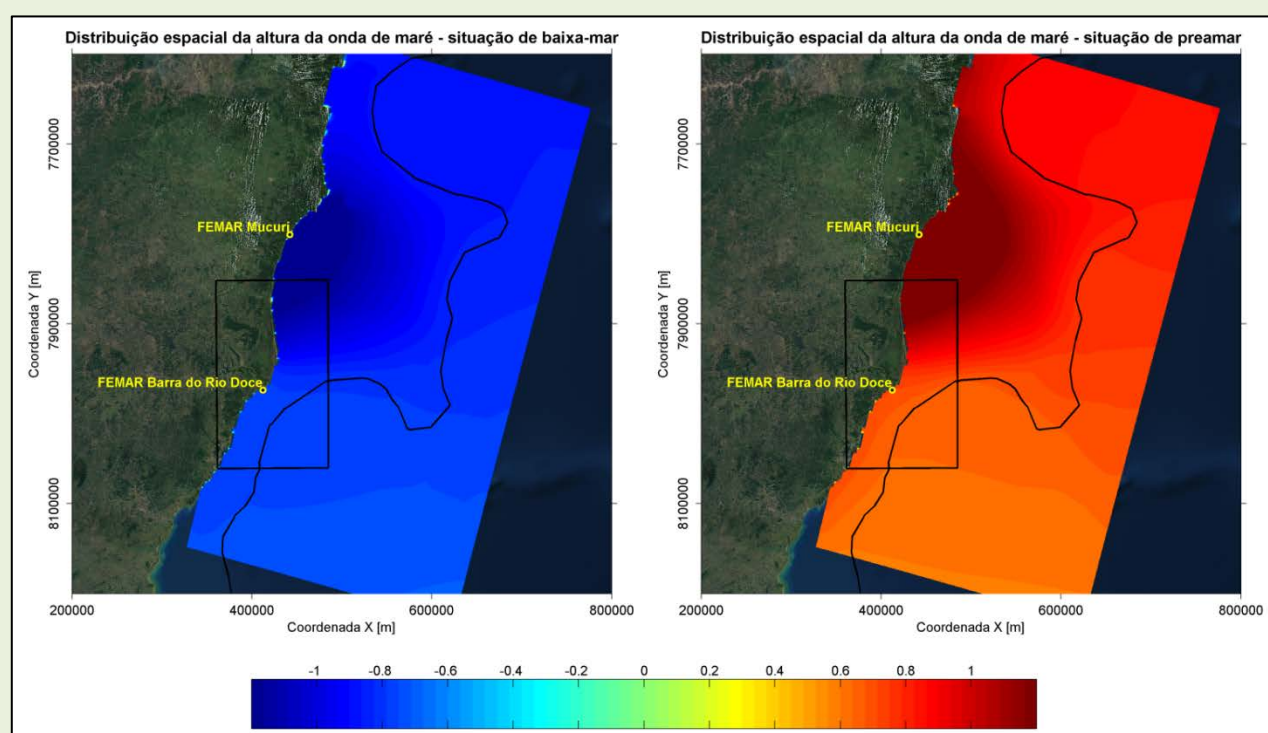


Figura 7: Variação espacial do nível de água na região do banco de Abrolhos. (A) Situação de baixa-mar, (B) Situação de preamar. As linhas pretas representam os limites do Banco de Abrolhos e a grade hidrodinâmica utilizada no modelo Delft3D.

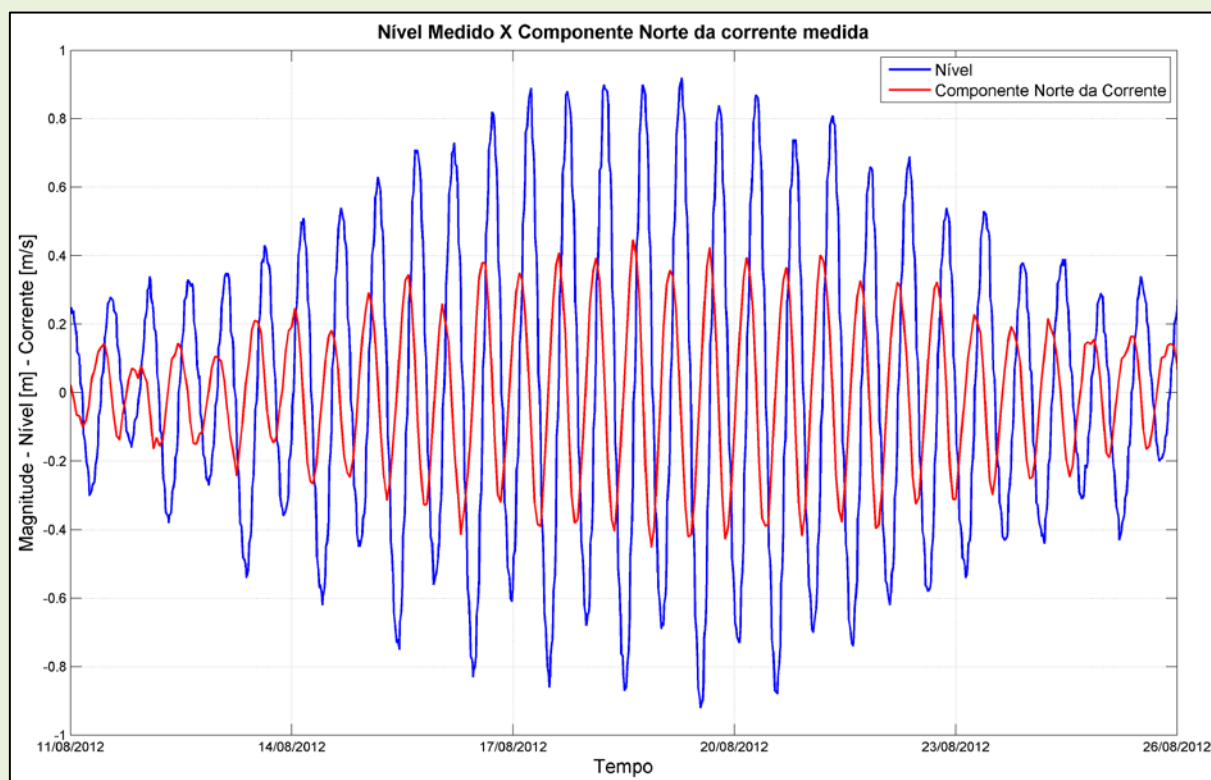


Figura 8: Dados medidos em campo de nível e componente norte da corrente. Exemplo da variação da corrente com período mareal, demonstrando que a corrente presente na região está associada principalmente à corrente de maré.

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 com cinco camadas verticais.

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) ou 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 quantidade de movimento é reduzida à relação da pressão hidrostática e as acelerações verticais são assumidas como sendo muito 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 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 Porto Norte Capixabda Manabi, em Linhares. A grade numérica possui maior refinamento na região do futuro Porto Norte Capixabda e do Rio Doce, de modo a representar de maneira satisfatória os processos hidrodinâmicos destas áreas (Figura 9).

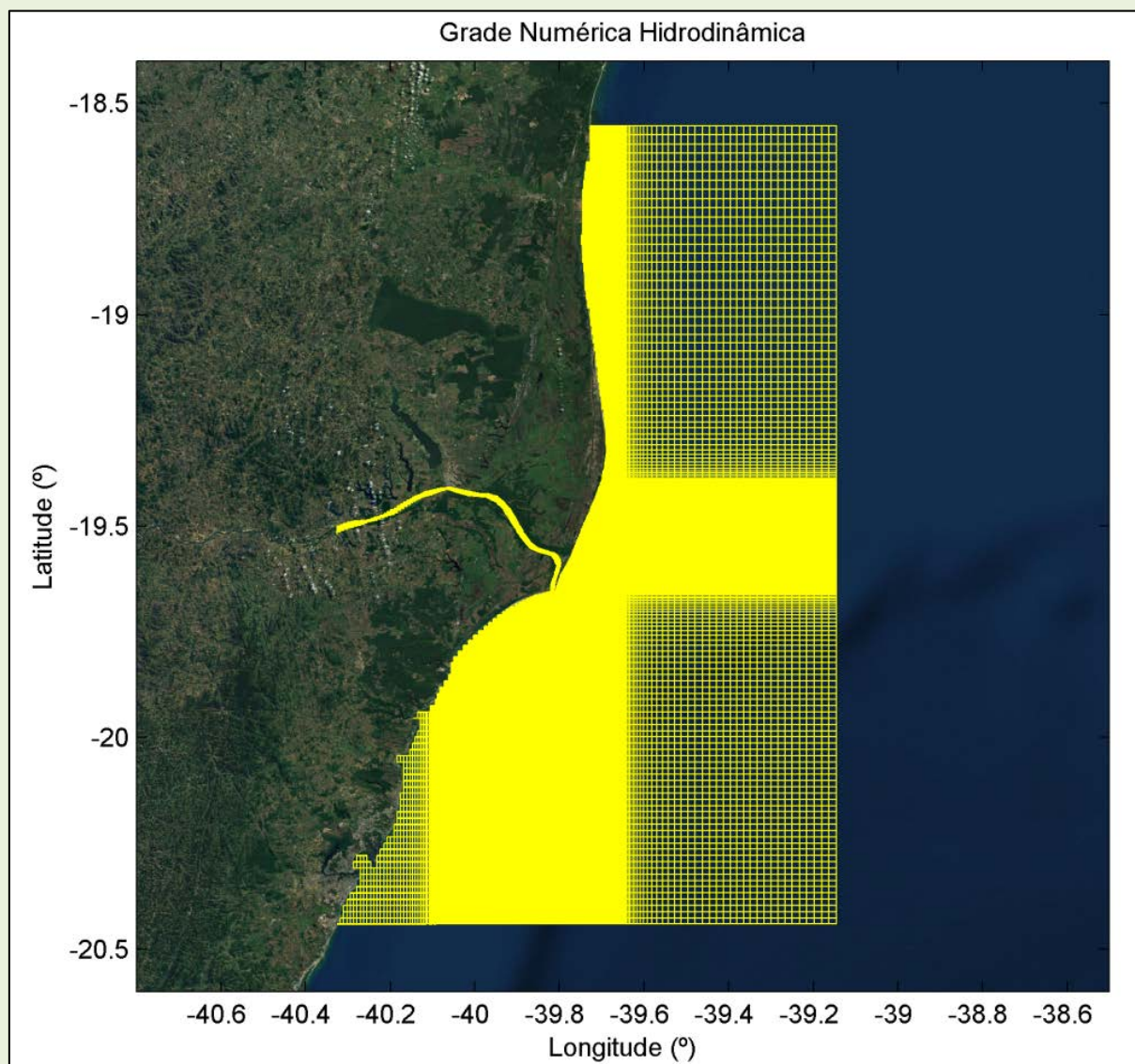


Figura 9: Grade numérica criada para resolver os processos hidrodinâmicos da área de estudo.

A grade numérica possui 368 x 303 elementos de cálculo (nós), com espaçamento variando de 150 m (na região do Porto Norte Capixabda e do rio Doce) a 1700 m (nas regiões mais distantes da área de interesse).

3.3 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 10 são apresentadas as cartas náuticas utilizadas para digitalização dos valores de profundidade. A descrição das cartas náuticas utilizadas é apresentada na, a seguir.

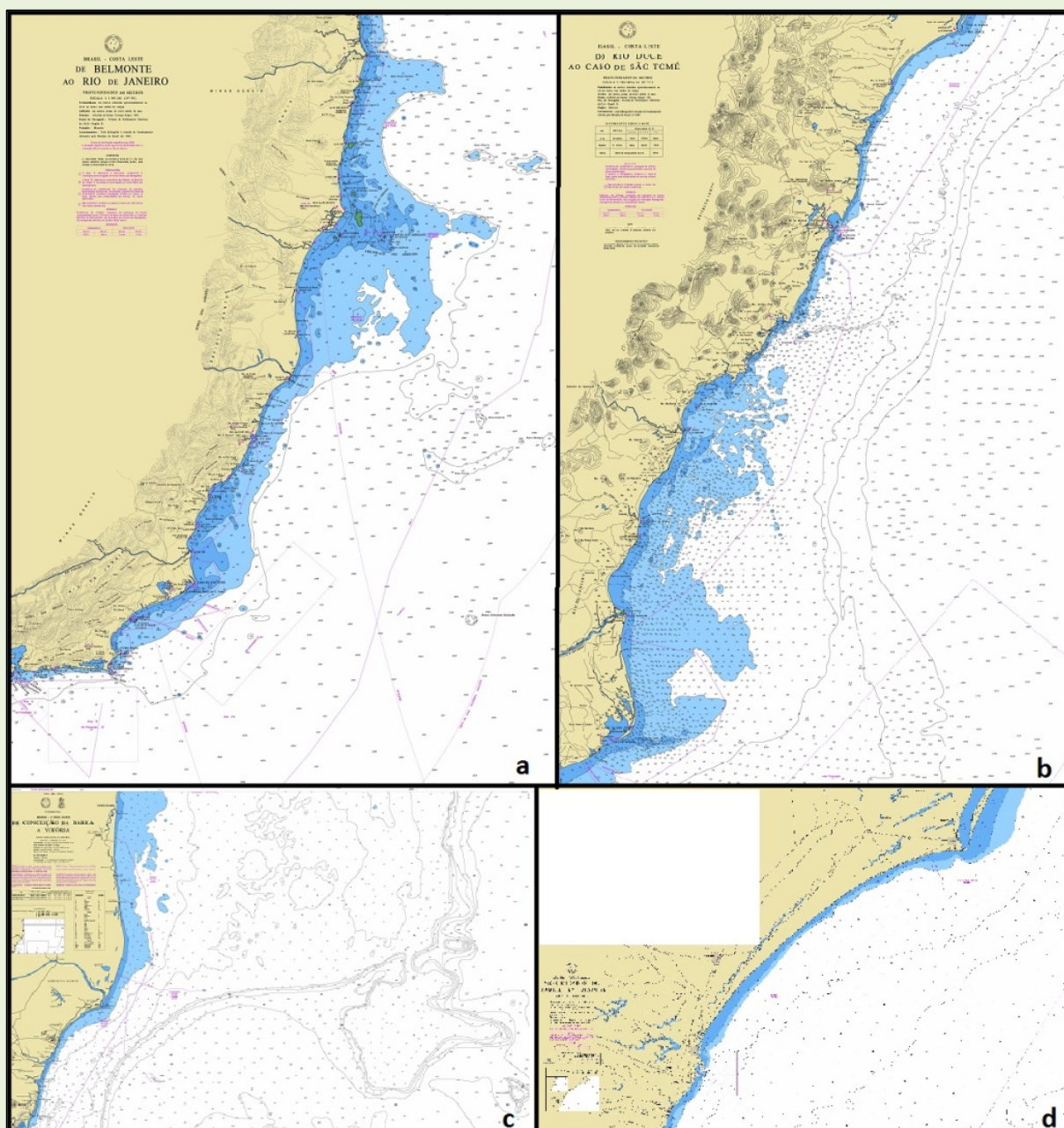


Figura 10 Cartas náuticas utilizadas para digitalização dos valores de profundidade. Cartas (a) 70, (b) 1400, (c) 22800, (d) 1420.

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 Porto Norte Capixabda são apresentados na Figura 11.

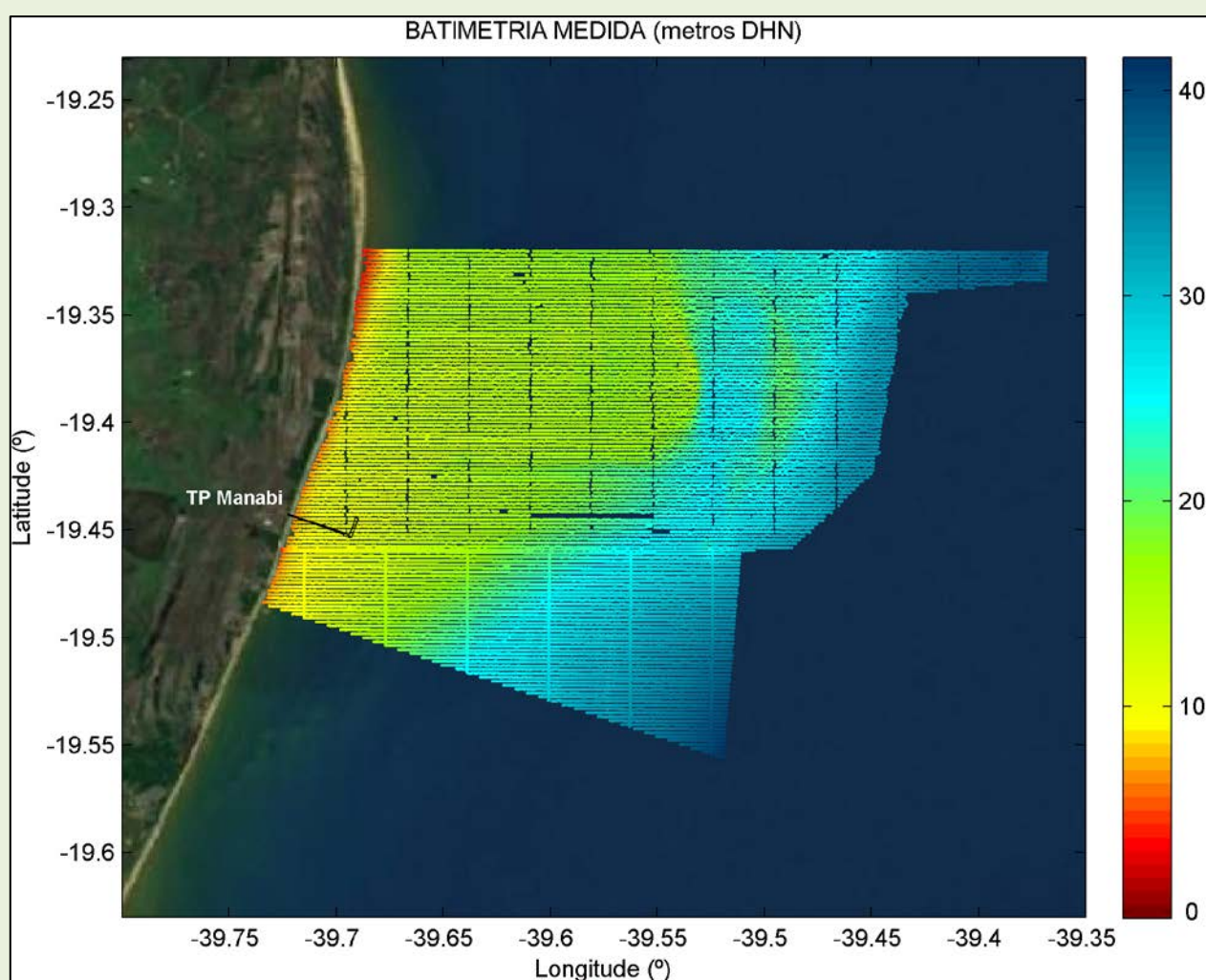


Figura 11: Pontos de batimetria obtidos pelos levantamentos batimétricos efetuados nas proximidades do futuro Porto Norte Capixabda – Linhares - ES. Batimetria composta por levantamento cedido pela empresa Econservation e levantamento efetuado pela Shaw Brasil (dados referenciados verticalmente ao nível zero DHN).

Os dados batimétricos das cartas náuticas e medidos foram combinados, rebatidos para o 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 12.

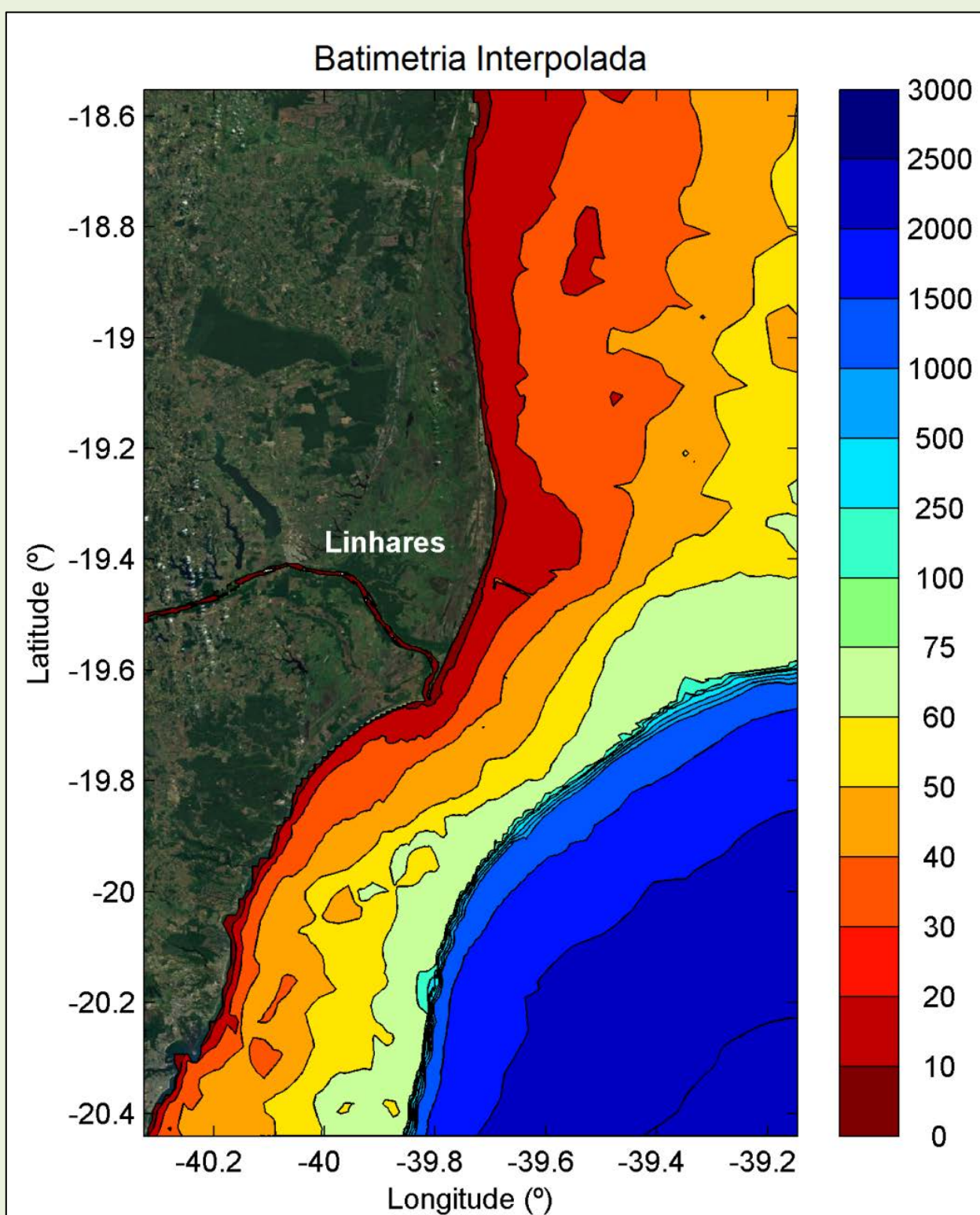


Figura 12: Batimetria interpolada e projetada na grade numérica do modelo (dados referenciados verticalmente ao nível médio do mar –N.M.).

3.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para gerar a base hidrodinâmica com o modelo numérico foram utilizados dados de elevação de nível d'água, vazão do rio Doce e ventos representativos da região de estudo.

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

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. A 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. Em evidência, os dados de janeiro a março utilizado para os meses de verão, e de junho a agosto utilizado para os meses de inverno.

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 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 CB&I (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 13. 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 de 0,05 m/s e 0,14 m/s para as correntes nas componentes dos eixos x e y, respectivamente, e de 0,05 m para elevação de nível.

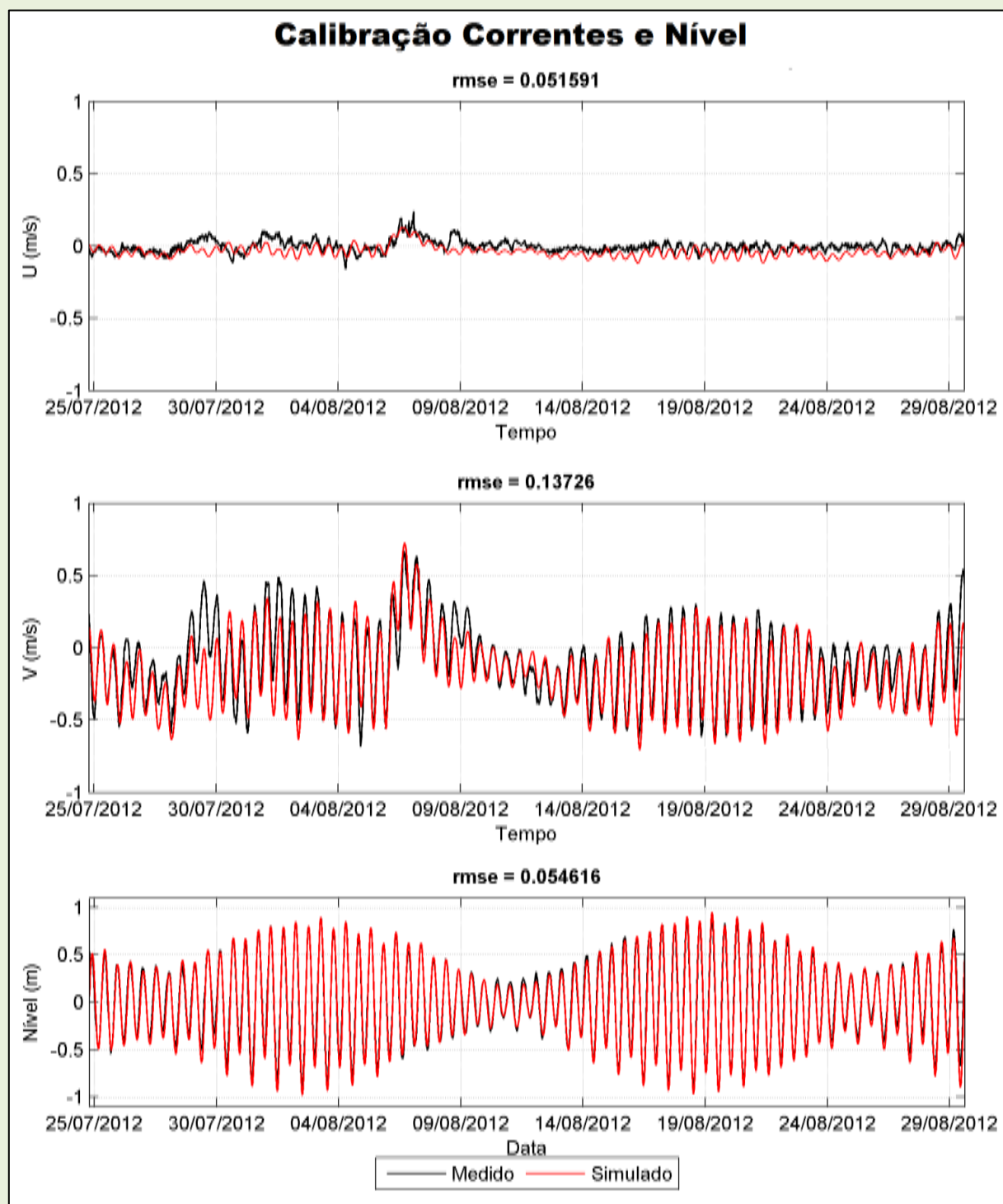


Figura 13: Calibração do modelo hidrodinâmico correntes e nível.

3.6 BASES HIDRODINÂMICAS DE VERÃO E INVERNO

Para as simulações das plumas de efluentes dos emissários foram geradas duas bases hidrodinâmicas distintas utilizando o modelo numérico Delft3D. Cada uma das bases corresponde a quatro meses de simulação representando os períodos de inverno e verão. As bases foram geradas utilizando como forçantes os dados de elevação de nível d'água, vazão do rio Doce, ventos e salinidade.

A base hidrodinâmica de verão compreende os meses de janeiro a março de 2011, cujos ventos foram obtidos do NCEP (Climate Forecast System Version 2 - CFSR). Durante esse período, os ventos vindos dos quadrantes Nordeste são mais frequentes (Albino e Suguio, 2010). A rosa dos ventos do período de verão é apresentada na Figura 14.

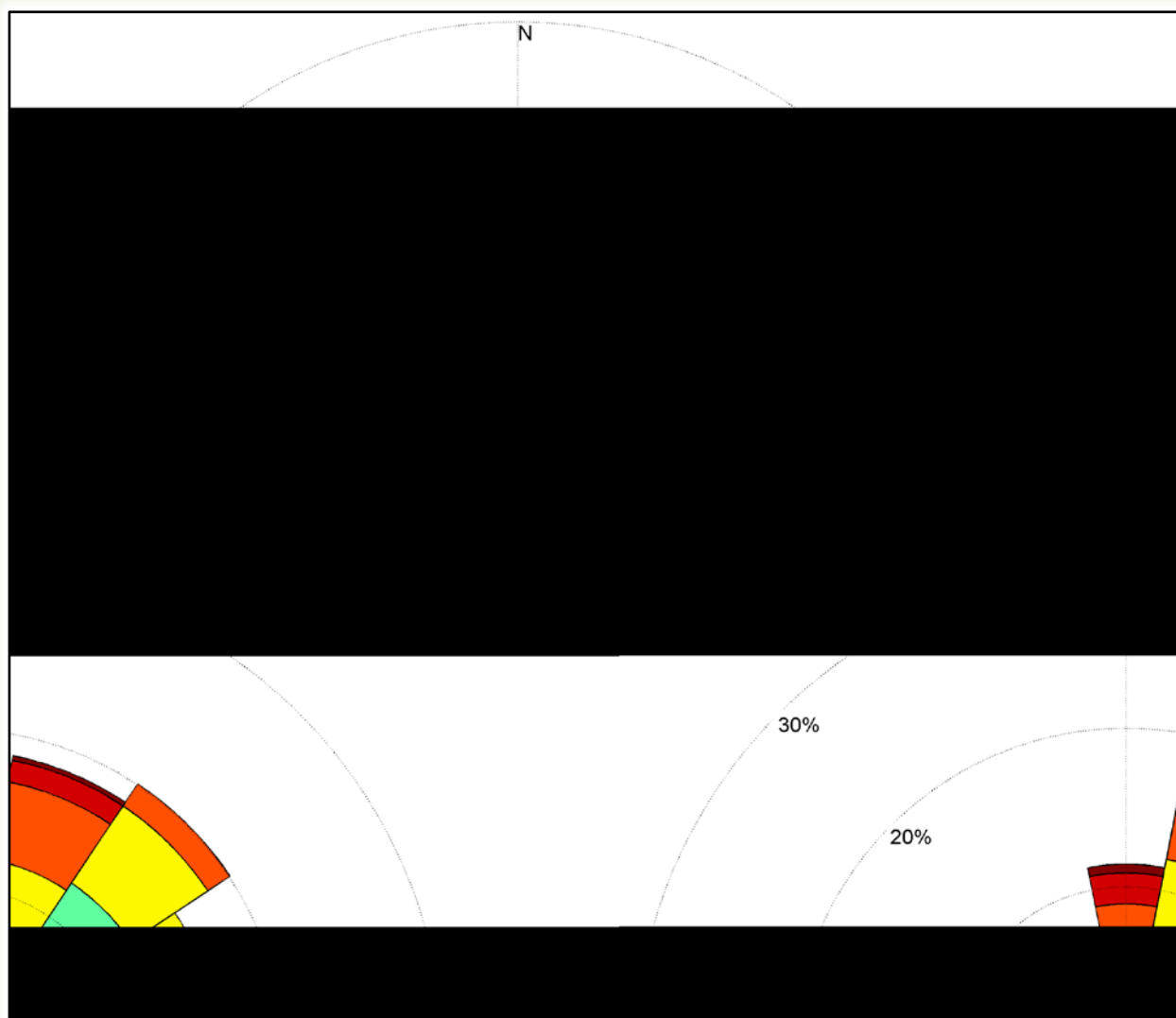


Figura 14: Rosa de ventos gerada com os dados provenientes do NCEP (CFSR) para o período de verão, utilizando dados de janeiro a março de 2011 (19,417° S, 39,15° O).

A base hidrodinâmica de inverno compreende os meses de julho a setembro 2011. Durante esse período os ventos mais frequentes variam entre Nordeste e Sudeste. Sob influência de frentes frias, os ventos do quadrante Sul se apresentam com maior intensidade (>12 m/s). A rosa dos ventos do período de inverno é apresentada na Figura 15.

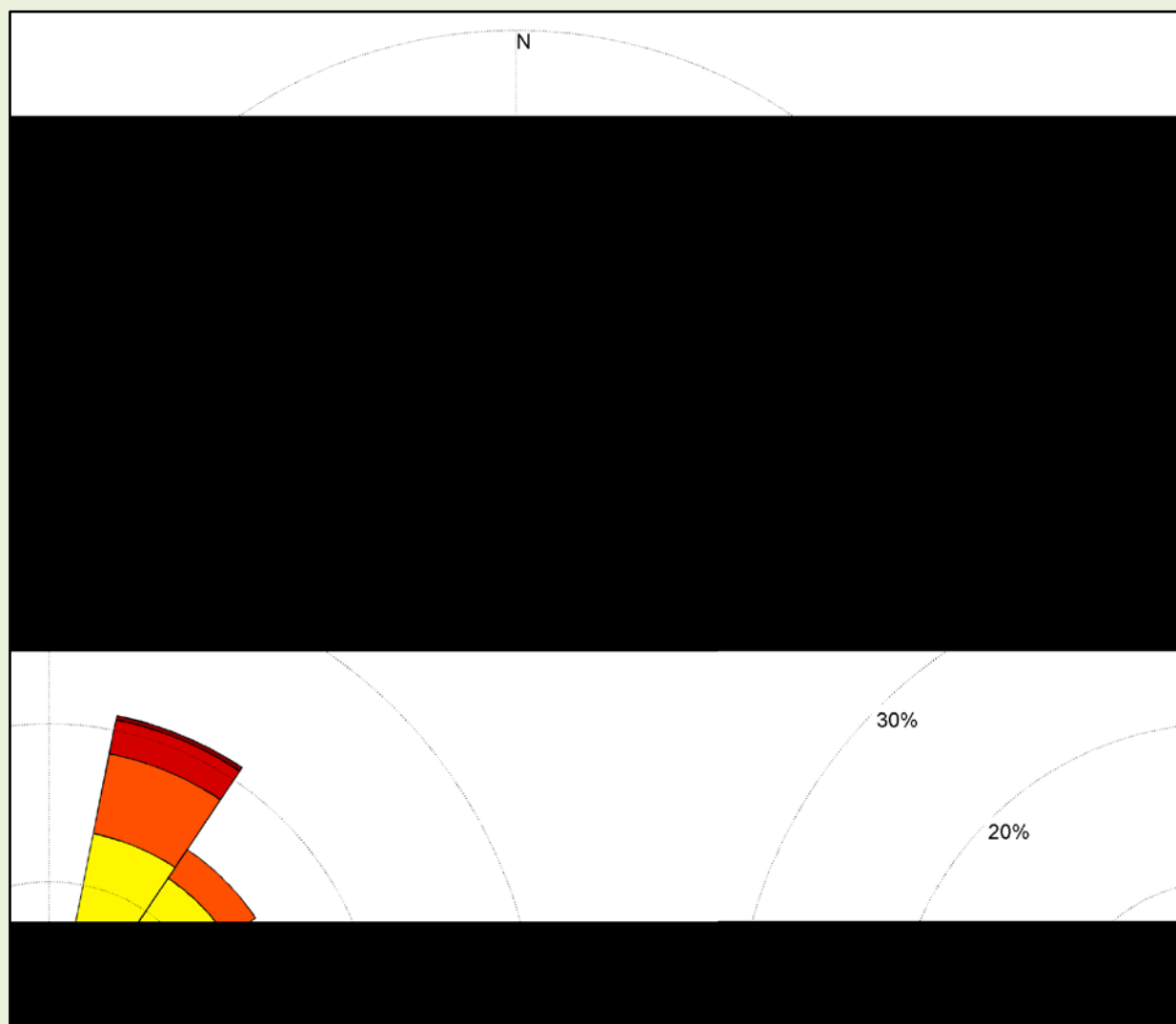


Figura 15: Rosa de ventos gerada com os dados provenientes do NCEP (CFSR) para o período de inverno, utilizando dados de julho a setembro de 2011 (19,417° S, 39,15° O).

Nas Figura 16 e Figura 17 são apresentados gráficos do tipo *Stick Plot* para os anos de 2011 e 2012. É possível observar a variação dos campos de vento ao longo dos meses do ano. Os dados de verão utilizados nas simulações das bases hidrodinâmicas estão grifados em laranja e os dados de inverno estão grifados em azul.

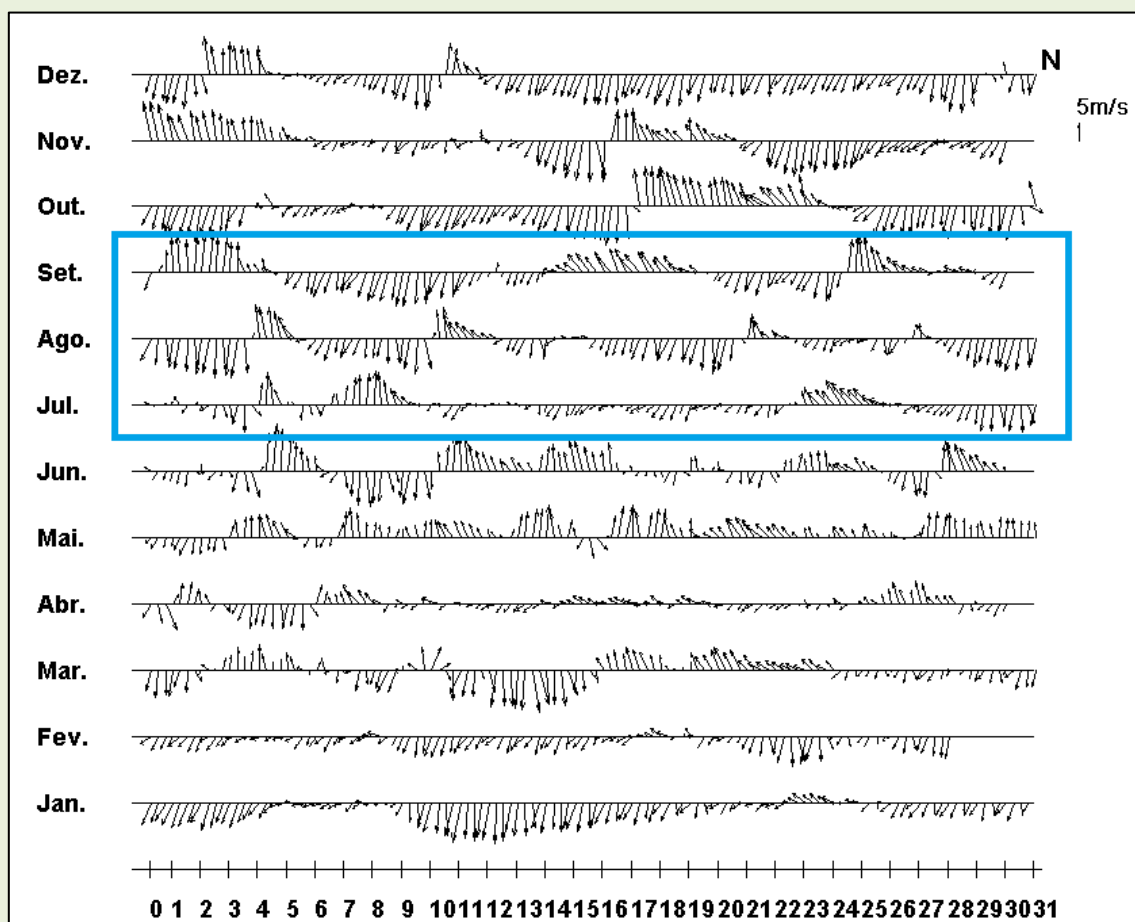


Figura 16: Direção e intensidades dos dados de vento do NCEP/NOAA extraídos para a região de estudo para o ano de 2009 (bloco laranja indica os meses de verão).

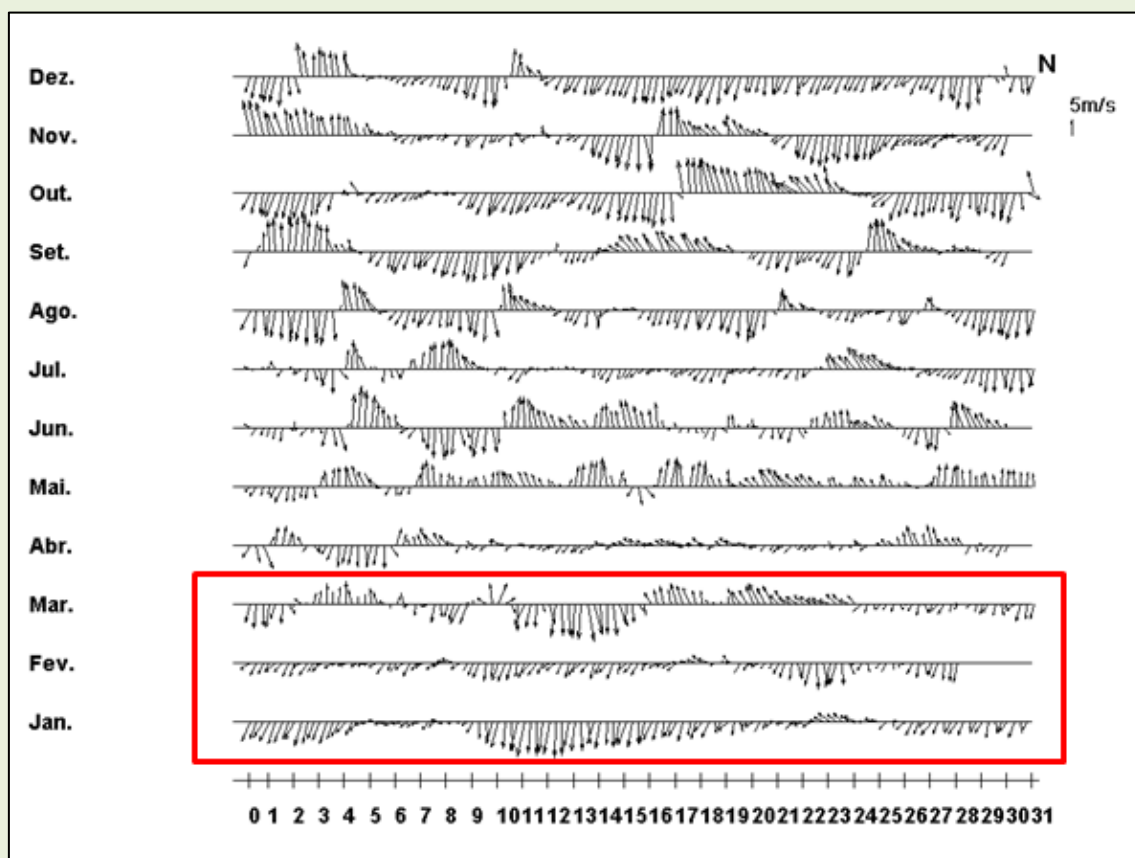


Figura 17: Direção e intensidades dos dados de vento do NCEP/NOAA extraídos para a região de estudo para o ano de 2011 (bloco vermelho indica os meses de verão e bloco azul indica os meses de inverno).

Os mapas vetoriais ilustrando os dados de correntes simulados pelo modelo numérico Delft3D estão apresentados da Figura 18 a Figura 25. As correntes na condição de maré de sizígia estão apresentadas da Figura 18 a Figura 21. 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 22 a Figura 24), 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.

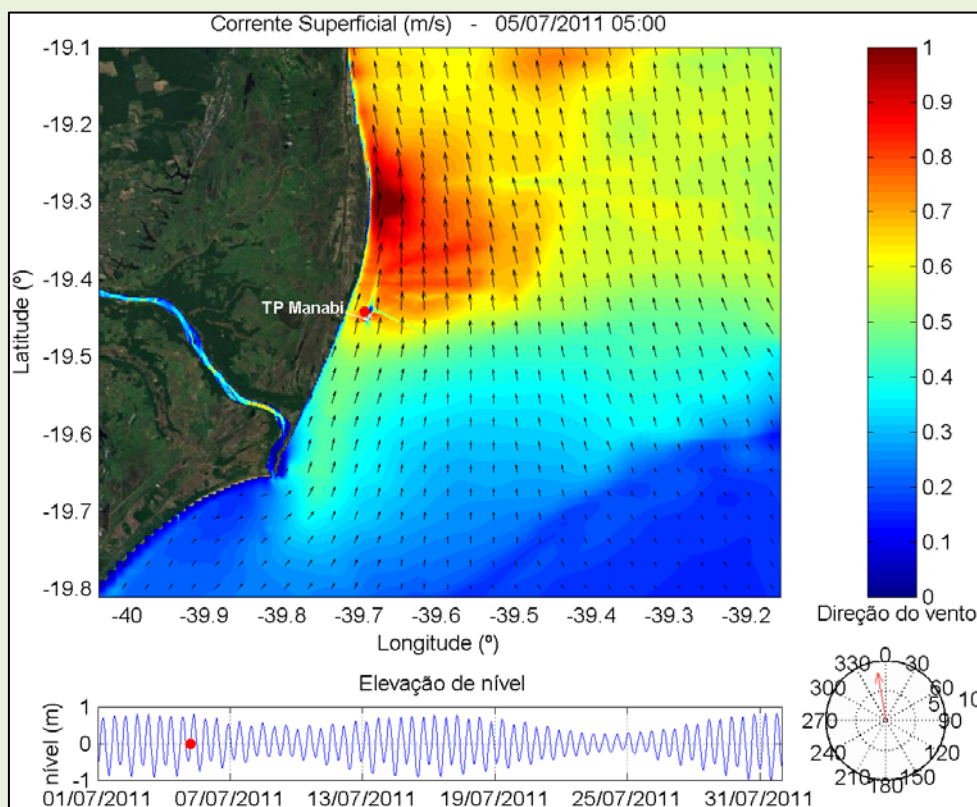


Figura 18: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no inverno com vento Sudeste e maré enchente de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

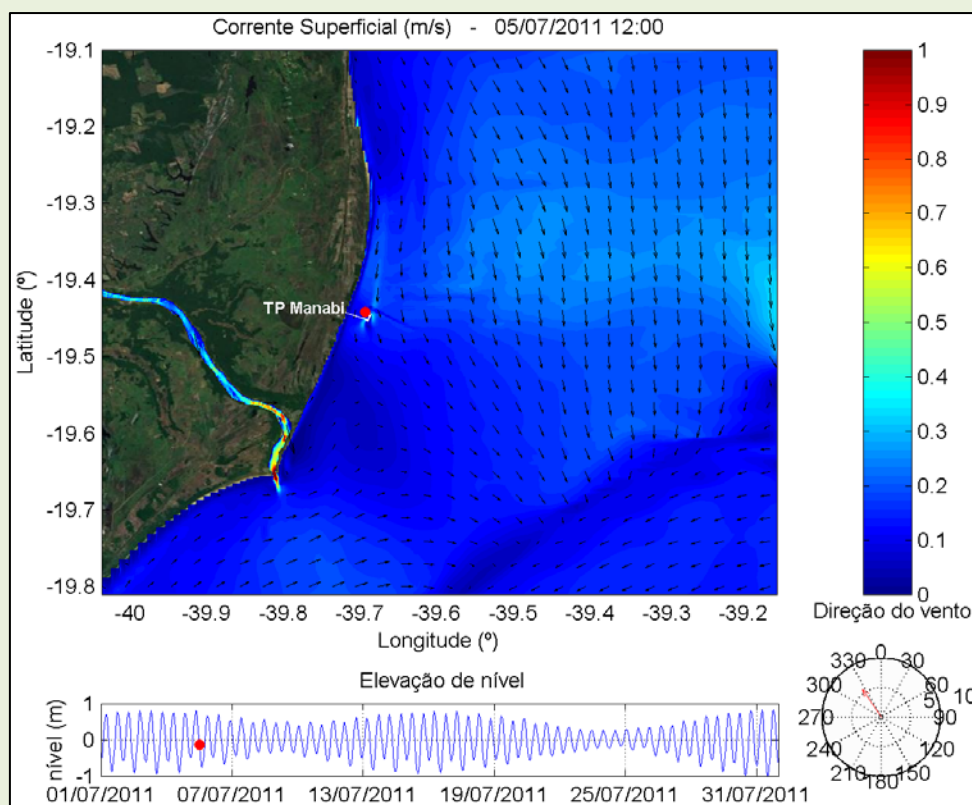


Figura 19: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no inverno com vento Sudeste e maré vazante de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

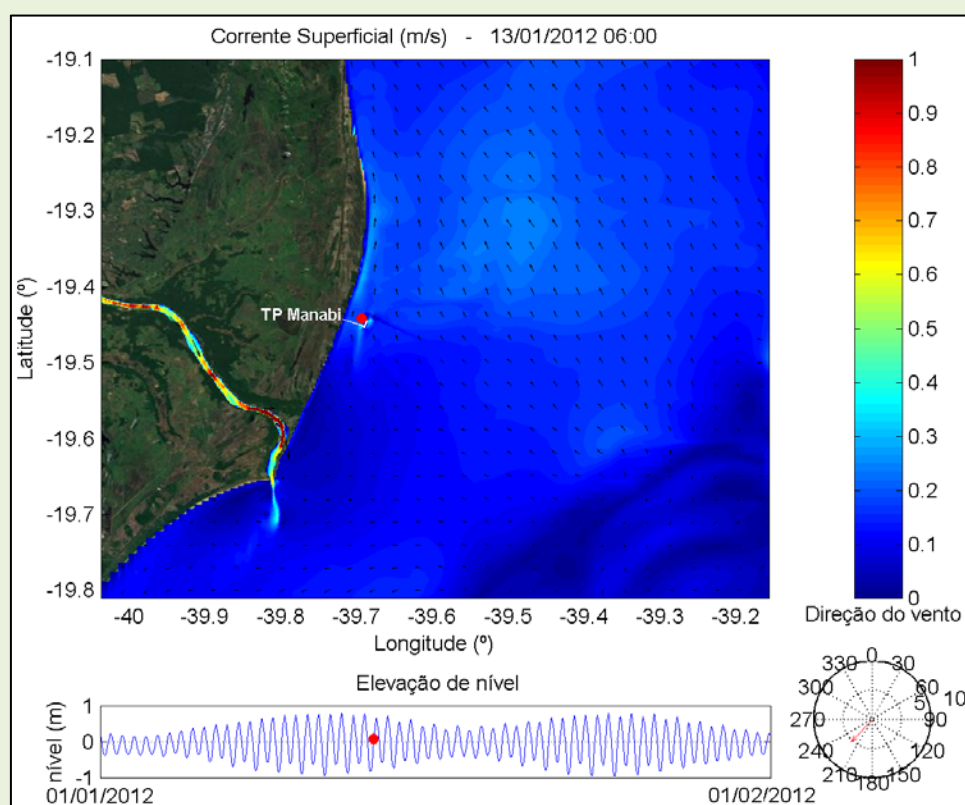


Figura 20: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no verão com vento Nordeste e maré enchente de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

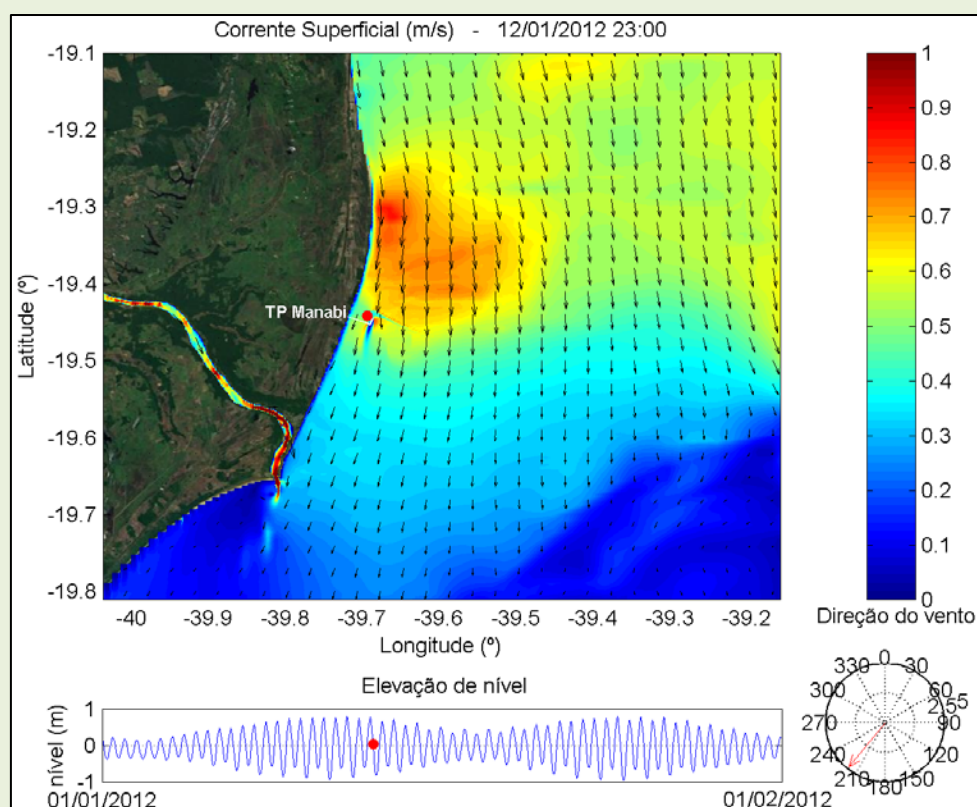


Figura 21: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no verão com vento Nordeste e maré vazante de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

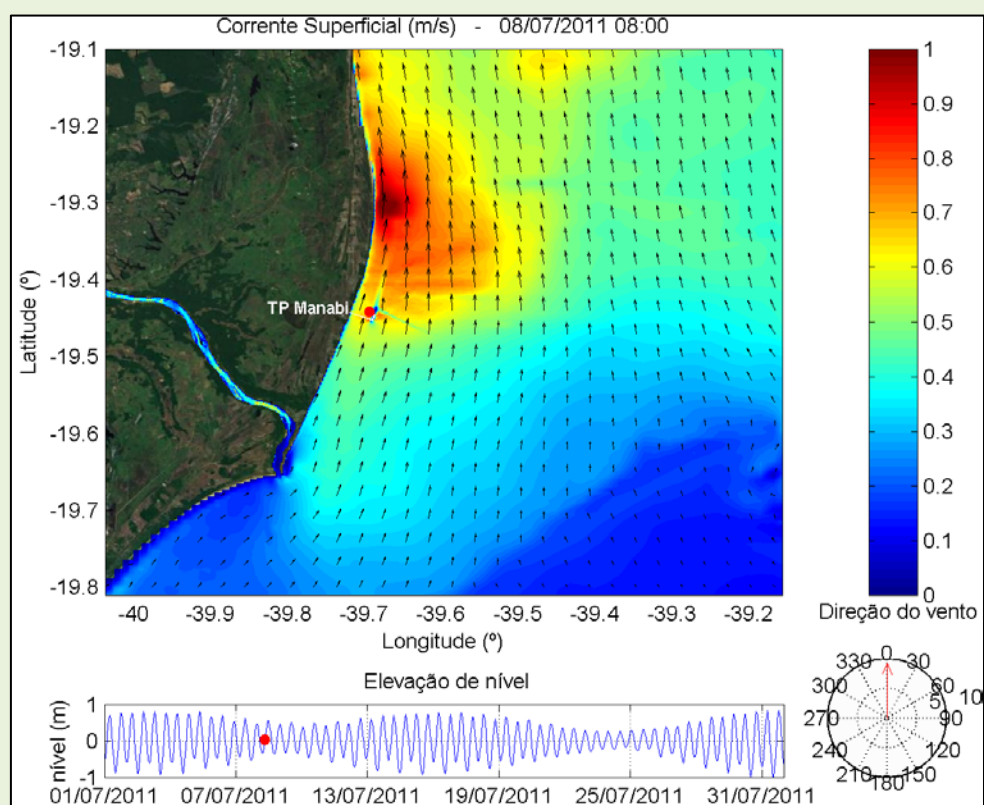


Figura 22: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no inverno com vento Sul e maré enchente de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

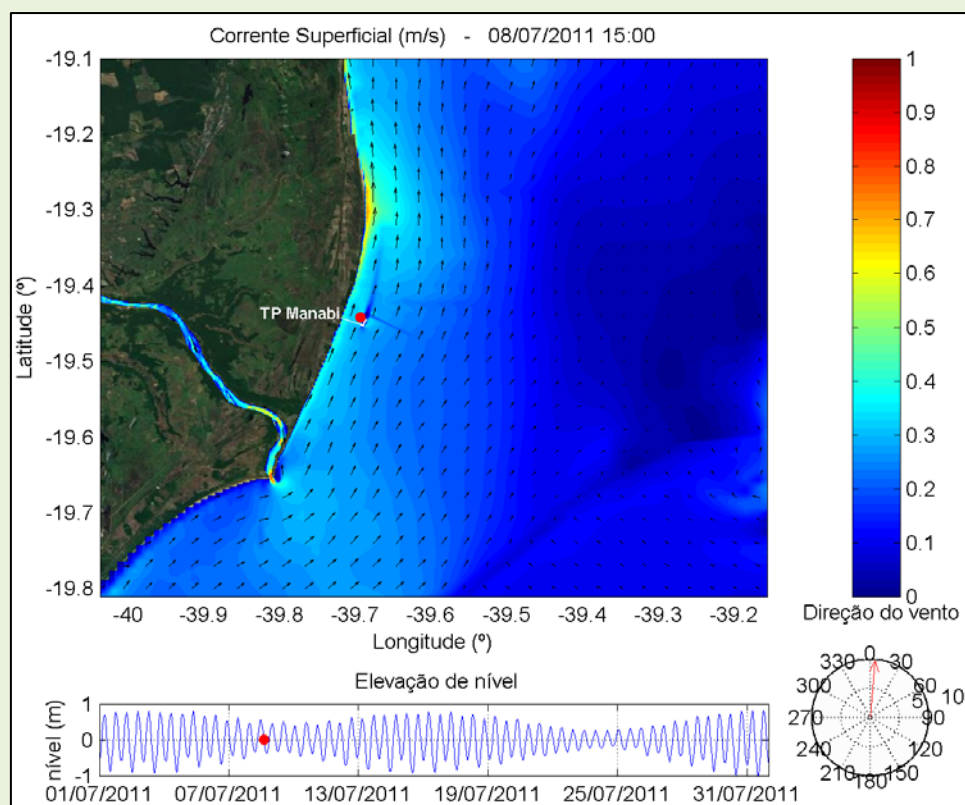


Figura 23: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no inverno com vento Sul e maré vazante de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

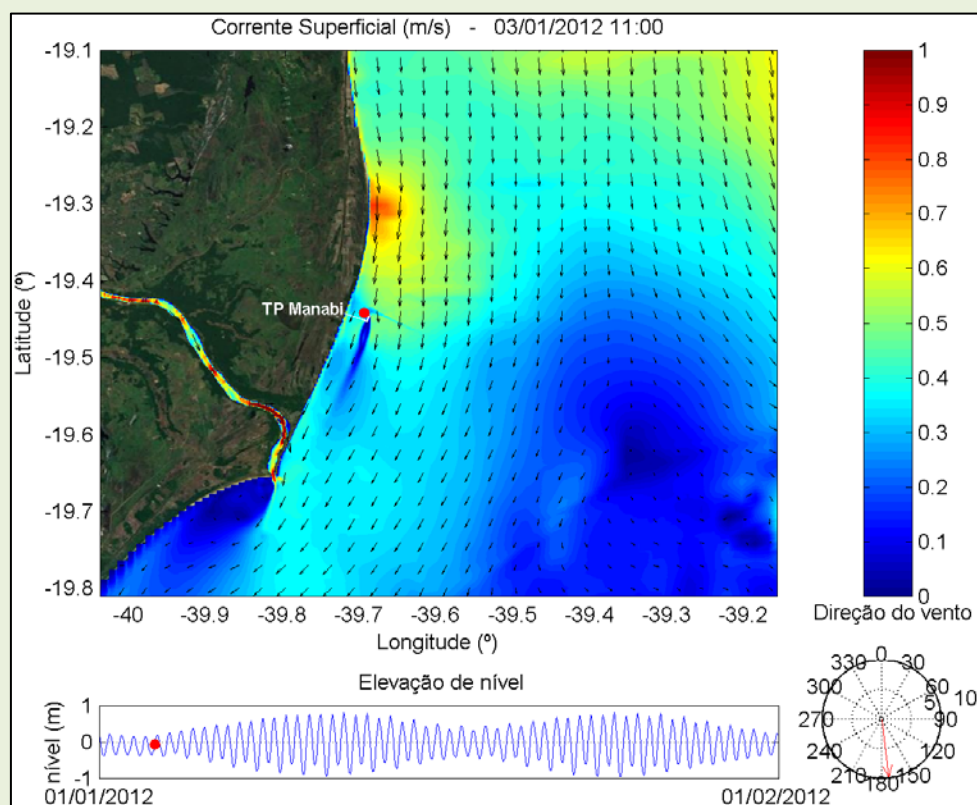


Figura 24: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no verão com vento Norte e maré enchente de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

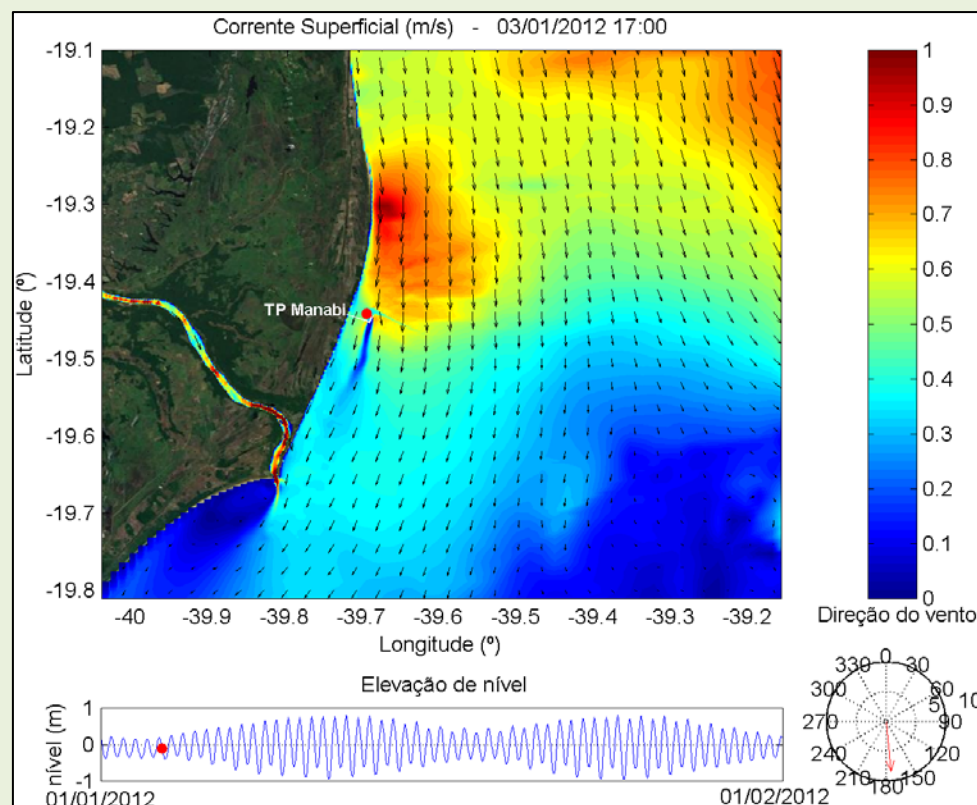


Figura 25: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no verão com vento Norte e maré vazante de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

3.7 MODELAGEM DA PLUMA DE EFLUENTES DO EMISSÁRIO

O modelo Delft3D foi utilizado para avaliação do padrão de dispersão da pluma de efluentes no mar proveniente do emissário submarino. Visto que o Delft3D não constitui um modelo para simular o comportamento do campo próximo, apenas do campo afastado, a eficiência do difusor não foi avaliada. Neste caso, o efluente é diretamente inserido na célula de fundo da grade numérica e passa a sofrer efeito imediato do campo de correntes na fase de diluição horizontal, sob efeito dominante dos processos de advecção e difusão turbulenta.

Foram simulados quatro pontos de descarga do emissário, estando cada um desses distantes da costa em 500, 1000, 1500 e 2000 metros (Figura 26). A profundidade em que está localizado cada ponto é apresentada na Tabela 6.

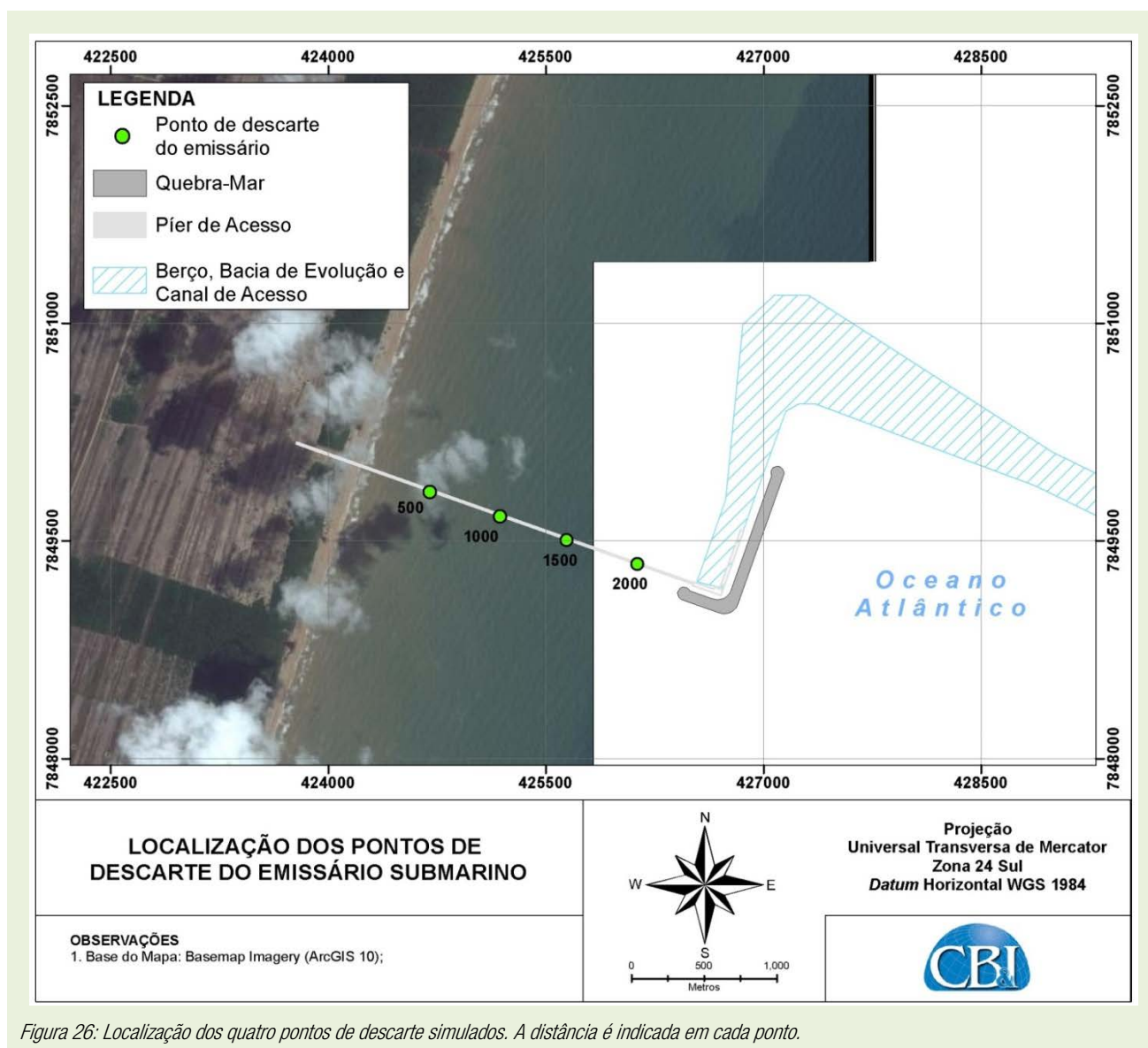


Figura 26: Localização dos quatro pontos de descarte simulados. A distância é indicada em cada ponto.

Tabela 6: Profundidade (DHN) em que está localizado cada ponto de descarte.

Ponto de Descarte	500	1000m	1500m	2000m
Profundidade (DHN)	6.7	8.7	9.7	10.2

Para simular o lançamento de efluentes pelo emissário, foi utilizado um traçador conservativo lançado na camada de fundo, com vazão constante de 1211 m³/h nos diferentes pontos locais. Embora o efluente a ser lançado seja tratado, foi utilizado de forma conservadora um efluente com concentração de 50 mg/L. Visto que o efluente será de água doce o modelo foi simulado com transporte de sal, utilizando-se salinidade de 36 g/kg nas fronteiras oceânicas.

A partir dessa condição e definição do modelo avaliou-se a variação da pluma do traçador ao longo da costa sobre influência dos processos advectivos e difusivos.

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.

3.7.1 Período de verão

Na Figura 27 são apresentados mapas de concentração média ao longo do tempo do traçador conservativo (em mg/L) nas camadas de superfície e fundo, lançado pelo emissário distante de 500, 1000, 1500 e 2000 metros da costa no período de verão.

Durante o verão, em decorrência da maior frequência de ventos do quadrante norte, a pluma do emissário se desloca para sul, sendo seu limite nesse sentido praticamente o mesmo nos quatro cenários: próximo à desembocadura do Rio Doce. A partir desse mesmo ponto, a pluma não alcança mais a costa, diminuindo visivelmente sua extensão. As concentrações médias do traçador diminuem à medida que o emissário fica mais distante da costa em decorrência do aumento da profundidade local e presença de correntes que auxiliam na dissolução do efluente. Muito próximo à saída do emissário, as concentrações apresentam valores máximos de concentração média ao longo do tempo de 0,01 mg/L. No cenário de 500 metros (mais próximo da costa), as concentrações médias que alcançam a costa foram de aproximadamente 0,01 mg/L. Comparados superfície e fundo, nota-se a similaridade no comportamento da pluma, indicando presença de dispersão vertical do traçador em decorrência da menor densidade do efluente em relação à água salina.

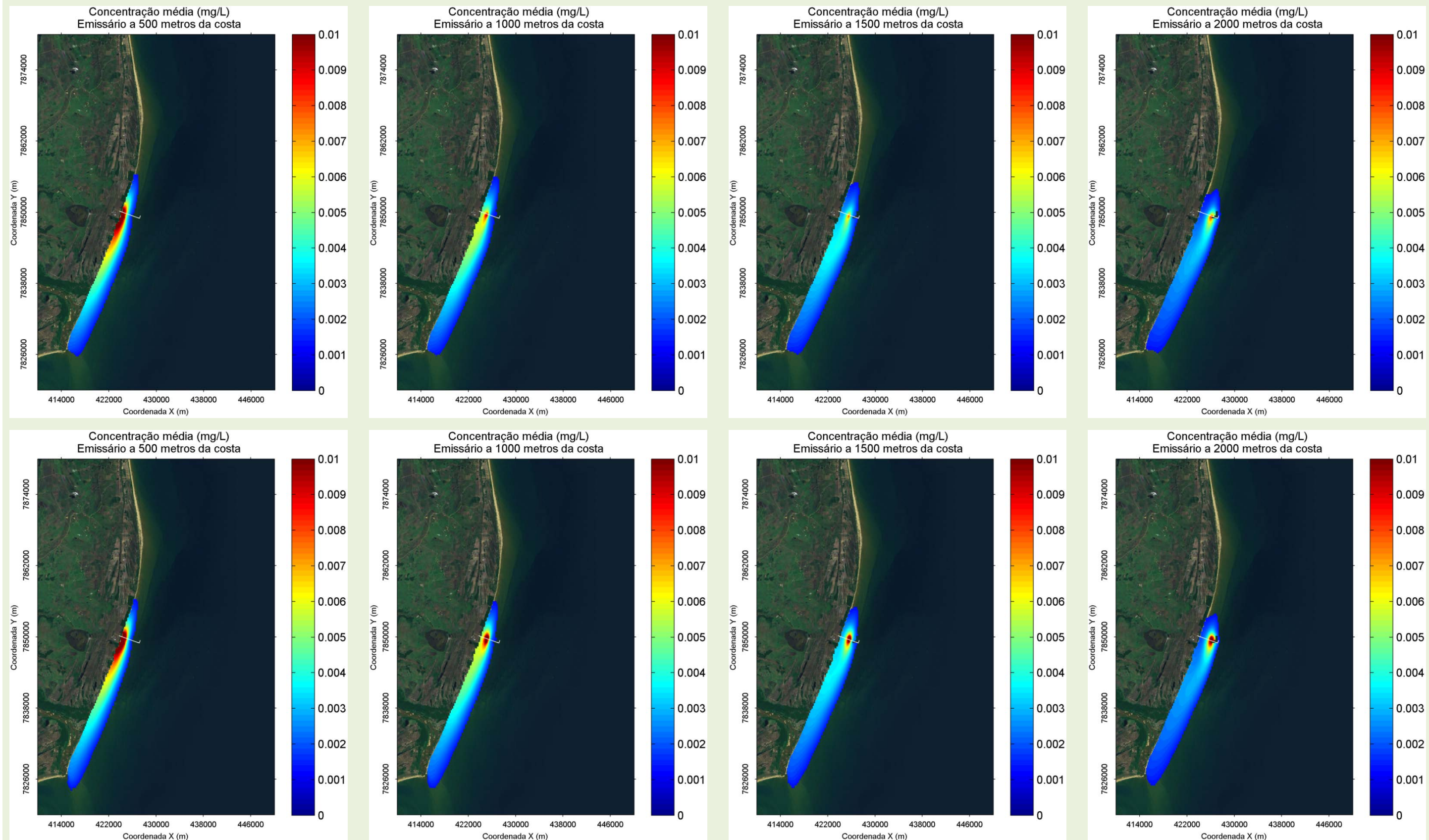


Figura 27: Concentração média (mg/L) do traçador conservativo nas camadas de superfície (figuras acima) e fundo (figuras abaixo) lançado a 500, 1000, 1500 e 2000 metros da costa no período de verão.

A fim de se analisar a distribuição espacial para diferentes valores de concentração do efluente, foram elaborados gráficos de frequências de ocorrência do traçador conservativo nas concentrações de corte de 0,01 e de 0,001 mg/L, indicando a frequência durante o período de simulação em que as concentrações de traçador conservativo são superiores a 0,01 e a 0,001 mg/L. Na Figura 28 são apresentadas as frequências de ocorrência do traçador conservativo em concentrações superiores a 0,01 mg/L. Na Figura 29, são apresentadas as frequências de ocorrência do traçador conservativo em concentrações superiores a 0,001 mg/L.

Em relação à concentração de corte de 0,01 mg/L, a extensão da pluma diminui quanto mais distante da costa o ponto de lançamento. A maior frequência de ocorrência dessas concentrações está muito próxima à saída do emissário, sendo os valores para a camada de superfície de 60 a 70% no cenário de 500 metros. Já para os pontos distantes de 1000 a 2000 metros este valor fica em torno de 10%. O comportamento de menor frequência de ocorrência em pontos mais distantes da costa é causado pelo aumento da profundidade, que favorece uma dispersão mais rápida da pluma ao longo da vertical em relação à dinâmica horizontal.

Já para a camada de fundo, a frequência de ocorrência na saída do emissário é de 100% para todos os cenários, de 500 a 2000 metros, porém o tamanho da mancha com 100% de ocorrência no tempo diminui consideravelmente para os cenários de 1500 e 2000 metros, em função da maior profundidade.

Em relação à concentração de corte de 0,001 mg/L, praticamente toda a extensão entre o píer e a desembocadura do Rio Doce apresenta valores de frequência de ocorrência de 100% do tempo no cenário de 500 metros, diminuindo esses à medida que se desloca para norte, para sul e para longe da costa. Apenas no cenário de 2000 metros os valores de frequência que alcançam a costa são inferiores a 70%. Os valores obtidos para a camada de superfície e de fundo são bastante similares, exceto pelo fato que na camada de superfície, pelo efeito do vento, a pluma tem maior deslocamento para sul, apresentando nessas áreas frequências menores que 20%.

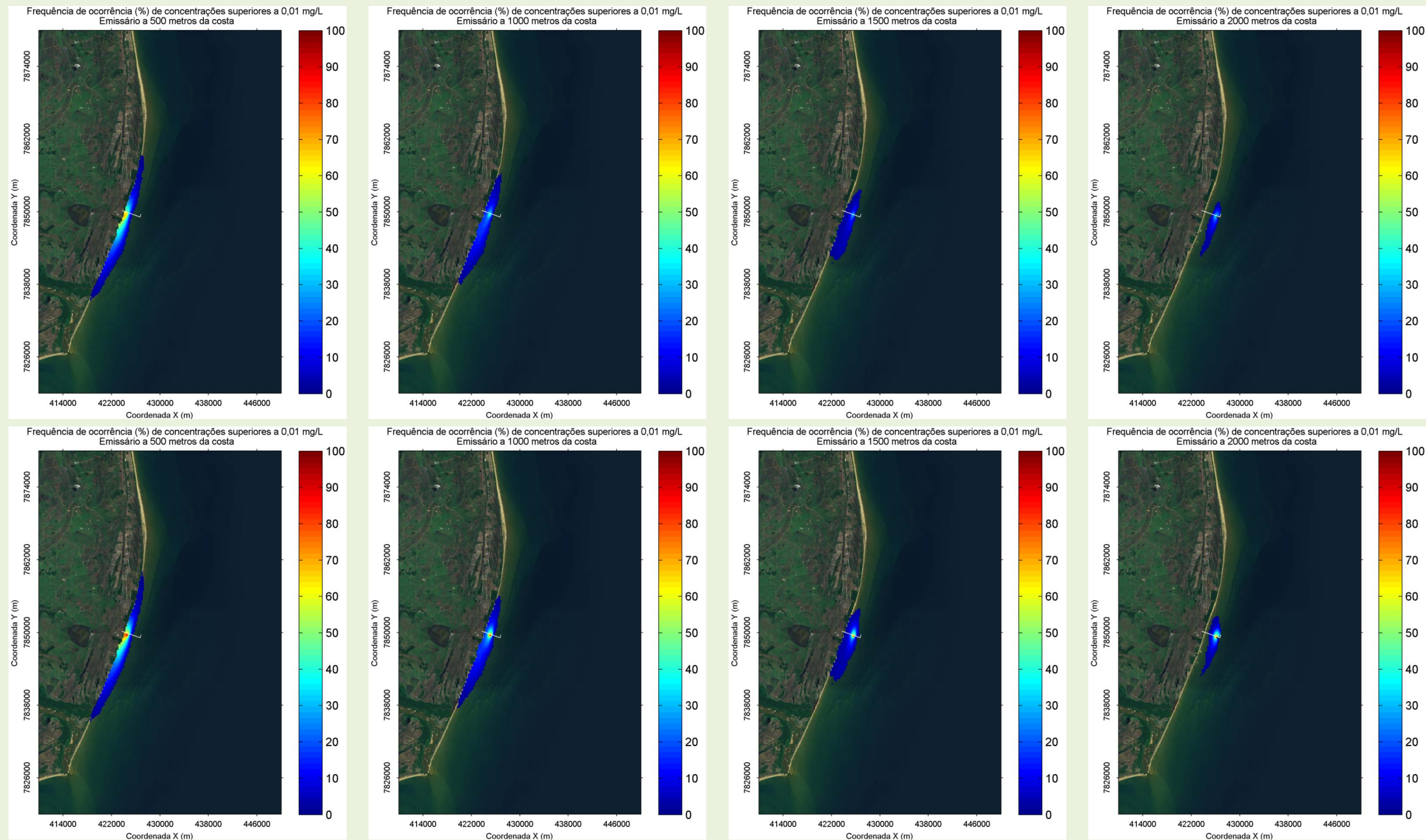


Figura 28: Frequência de ocorrência (%) das concentrações superiores a 0,01 mg/L do traçador conservativo nas camadas de superfície (figuras acima) e fundo (figuras abaixo) lançado a 500, 1000, 1500 e 2000 metros da costa no período de verão.

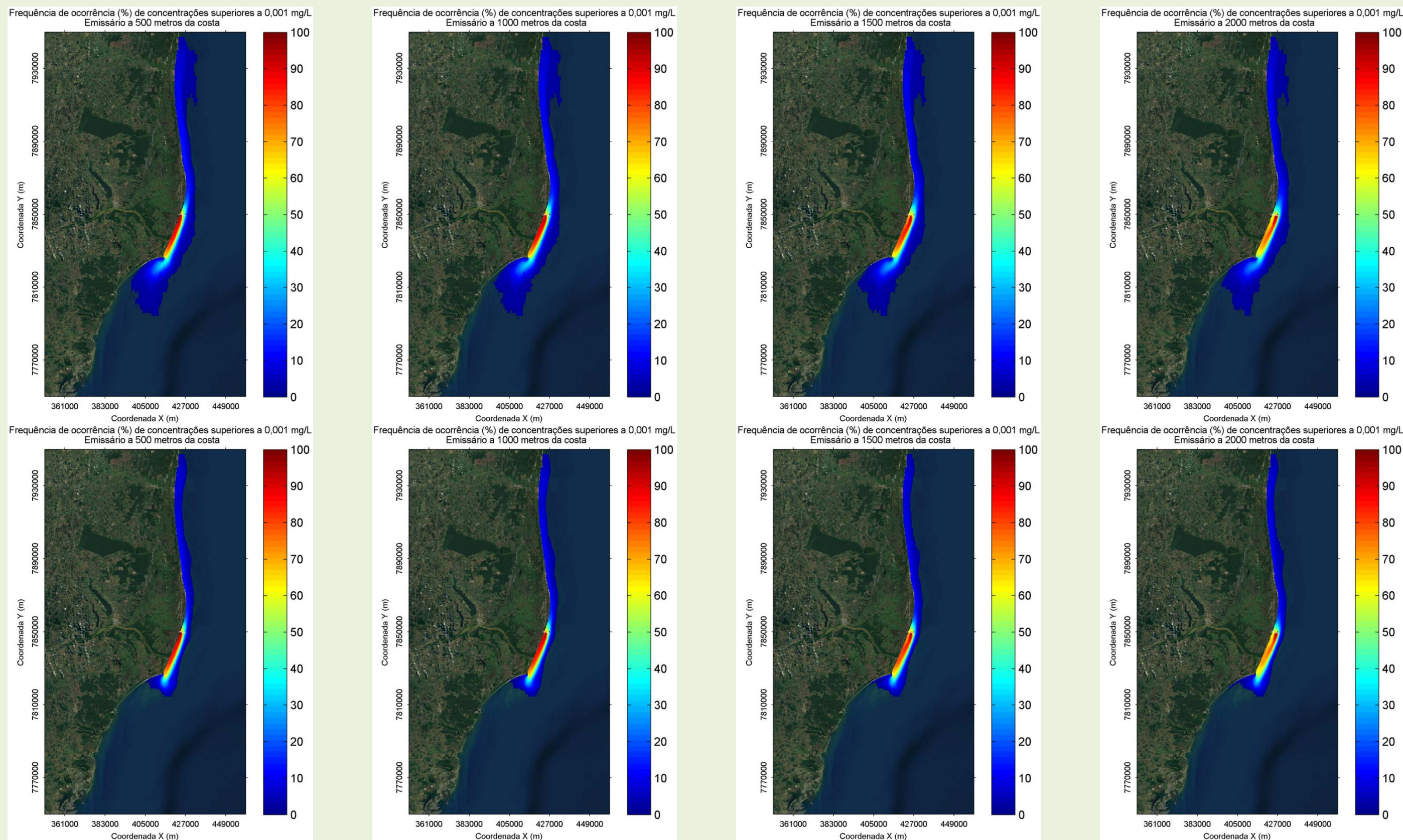


Figura 29: Frequência de ocorrência (%) das concentrações superiores a 0,001 mg/L do traçador conservativo nas camadas de superfície (figuras acima) e fundo (figuras abaixo) lançado a 500, 1000, 1500 e 2000 metros da costa no período de verão.

A fim de avaliar a concentração instantânea para os diferentes cenários nas proximidades da costa, foram definidos quatro pontos ao sul do terminal Manabi, dispostos conforme Figura 30.

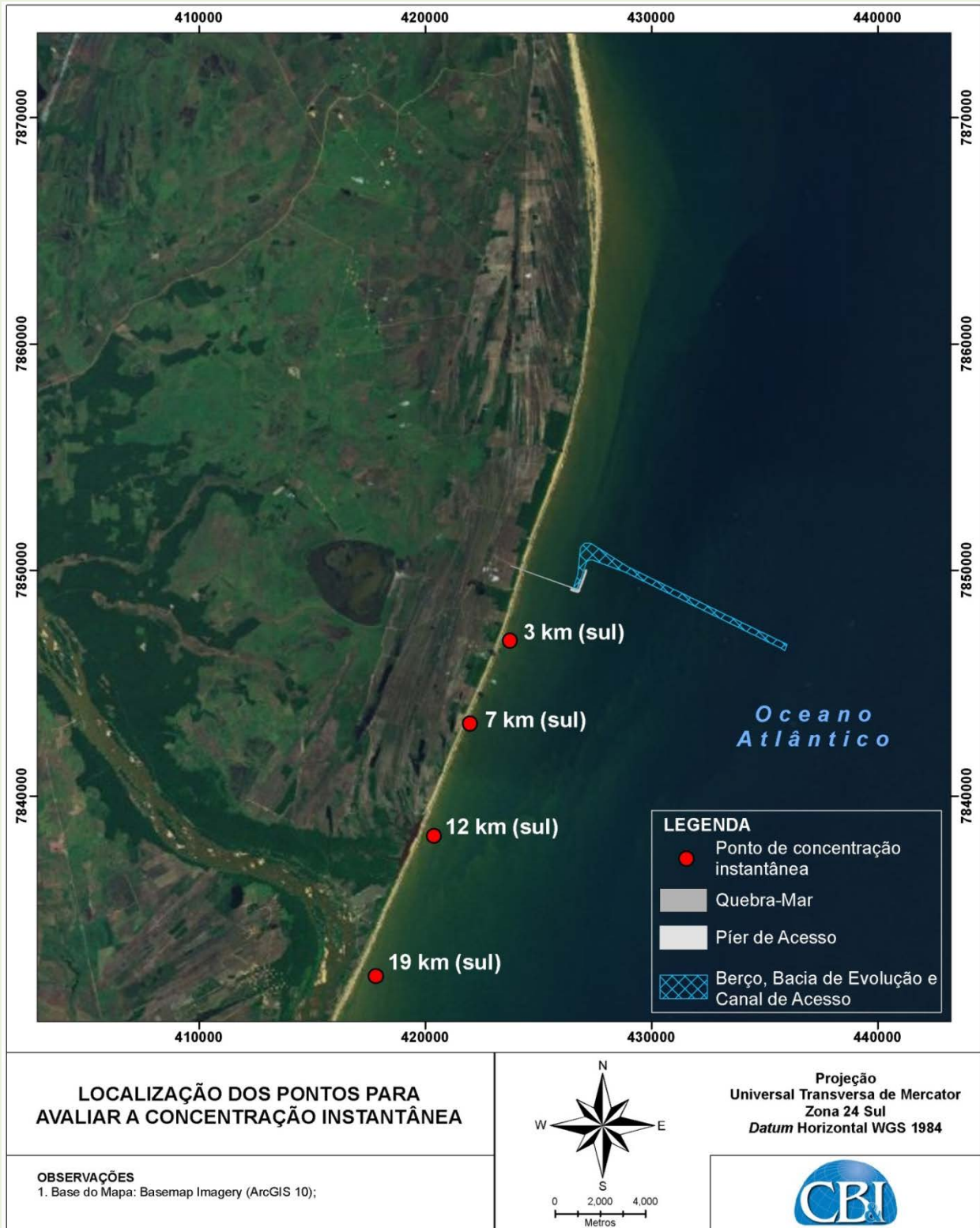
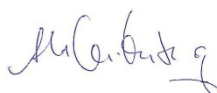


Figura 30: Localização dos pontos para avaliação das concentrações instantâneas.

As séries temporais da concentração instantânea do traçador conservativo para os cenários distantes de 500 a 2000 metros da costa podem ser observados na Figura 31.

Como esperado, para todos os cenários, à medida que se afasta do ponto de lançamento os valores de concentração nos pontos próximos à costa tendem a diminuir.

No entanto, em decorrência da baixa vazão de efluente, mesmo simulando uma alta concentração de efluentes (50 mg/L), as concentrações nos pontos próximos à costa para o cenário de emissário mais próximo da costa (500 m) não ultrapassam valores de 0,030 mg/L.



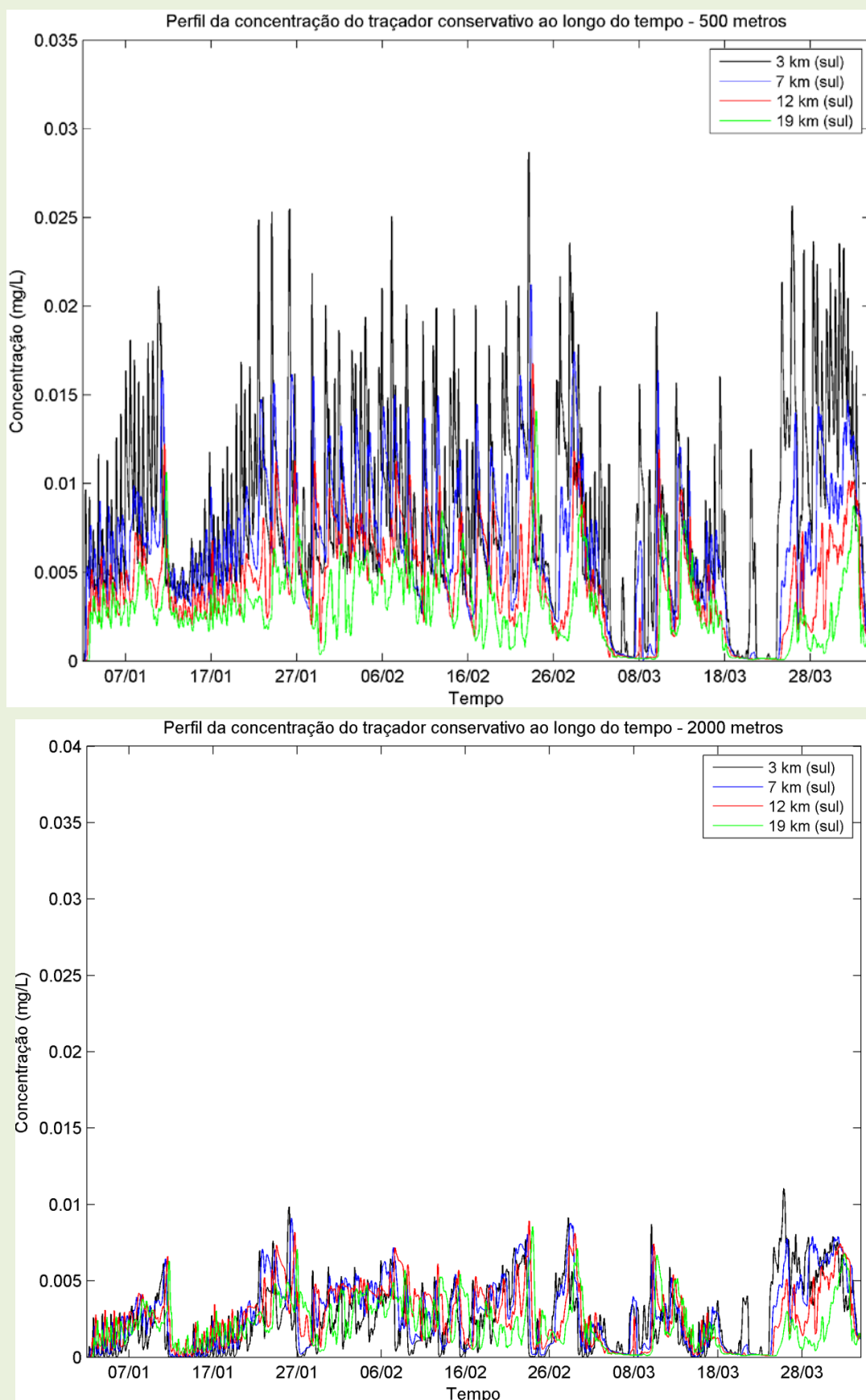


Figura 31: Perfis de concentração do traçador conservativo ao longo do tempo para os emissários a 500 e 2000 metros da costa no período de **verão**.

3.7.2 Período de inverno

Na Figura 32 são apresentados mapas de concentração média ao longo do tempo do traçador conservativo (em mg/L) nas camadas de superfície e fundo, lançado pelo emissário distante de 500, 1000, 1500 e 2000 metros da costa no período de inverno.

Durante o inverno, em decorrência da maior variabilidade de ventos entre quadrantes norte e sul, a pluma do emissário se desloca tanto para sul quanto para norte, sendo maior esse deslocamento quanto mais próximo da costa está o ponto de lançamento. Em todos os cenários a pluma alcança a costa, e em relação à concentração do traçador, o pior dos cenários refere-se ao ponto distante a 500 metros visto a grande área de ocorrência de concentrações máximas (0,1 mg/L). A partir do cenário de 500 metros, há uma visível diminuição das concentrações à medida que se aumenta a distância de lançamento, entretanto, esse valor máximo ocorre muito próximo ao ponto de saída do emissário em todos os cenários. Assim como para o período de verão, o comportamento da pluma do emissário na superfície e no fundo no inverno é similar.

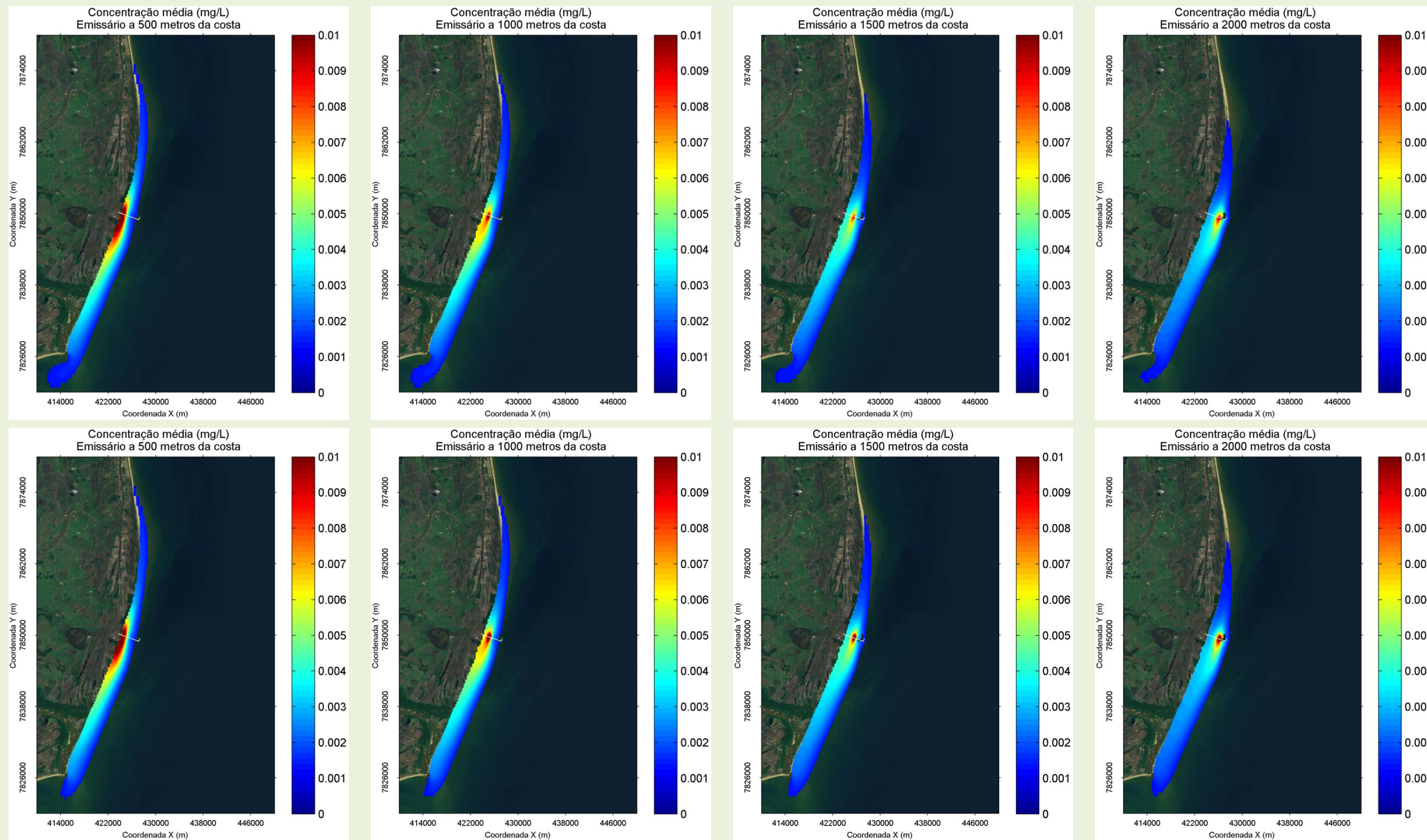


Figura 32: Concentração média (mg /L) do traçador conservativo nas camadas de superfície (figuras acima) e fundo (figuras abaixo) lançado a 500, 1000, 1500 e 2000 metros da costa no período de inverno

A fim de se analisar a distribuição espacial para diferentes valores de concentração do efluente, foram elaborados gráficos de frequências de ocorrência do traçador conservativo nas concentrações de corte de 0,01 e de 0,001 mg/L, indicando a frequência durante o período de simulação em que as concentrações de traçador conservativo são superiores a 0,01 e a 0,001 mg/L.

Na Figura 33 são apresentadas as frequências de ocorrência do traçador conservativo em concentrações superiores a 0,01 mg/L para as simulações de inverno. Na Figura 34 são apresentadas as frequências de ocorrência do traçador conservativo em concentrações superiores a 0,001 mg/L.

Em relação à concentração de corte de 0,01 mg/L, a extensão da pluma diminui quanto mais distante o ponto de lançamento. Os maiores valores de frequência de ocorrência, assim como no verão, ocorrem muito próximos ao ponto de lançamento do emissário: para a camada de superfície, são observados valores de cerca de 60% no cenário mais próximo à costa, havendo decréscimo desses a 40% até o cenário de 2000 metros. Já para a camada de fundo, o ponto mais próximo ao lançamento apresenta 70% de ocorrência, e mesmo com a diminuição da dimensão da pluma, as proporções da frequência mantiveram-se constantes ao longo de todos os cenários, porém com manchas menores nos pontos mais distantes.

Em relação à concentração de corte de 0,001 mg/L, praticamente não houve diferença na extensão da pluma de efluentes nos diferentes cenários (500 a 2000 metros). No cenário de 500 metros, a frequência de ocorrência foi de aproximadamente 90% nas porções mais próximas ao local de lançamento e à costa, enquanto no cenário de 2000 metros, os valores que chegaram à costa são de cerca de 75%. As frequências de ocorrência são praticamente iguais quando comparadas as camadas de superfície e fundo, exceto pelo fato que nas camadas de superfície há o deslocamento da pluma para sul e norte, e nas camadas de fundo a pluma que migra para o sul fica localizada junto à costa, porém ocorrendo em menos de 10% do tempo. Isto ocorre pelo fato de que na camada de superfície sofre influência direta da influência do vento, e por conseguinte, de sua variabilidade.

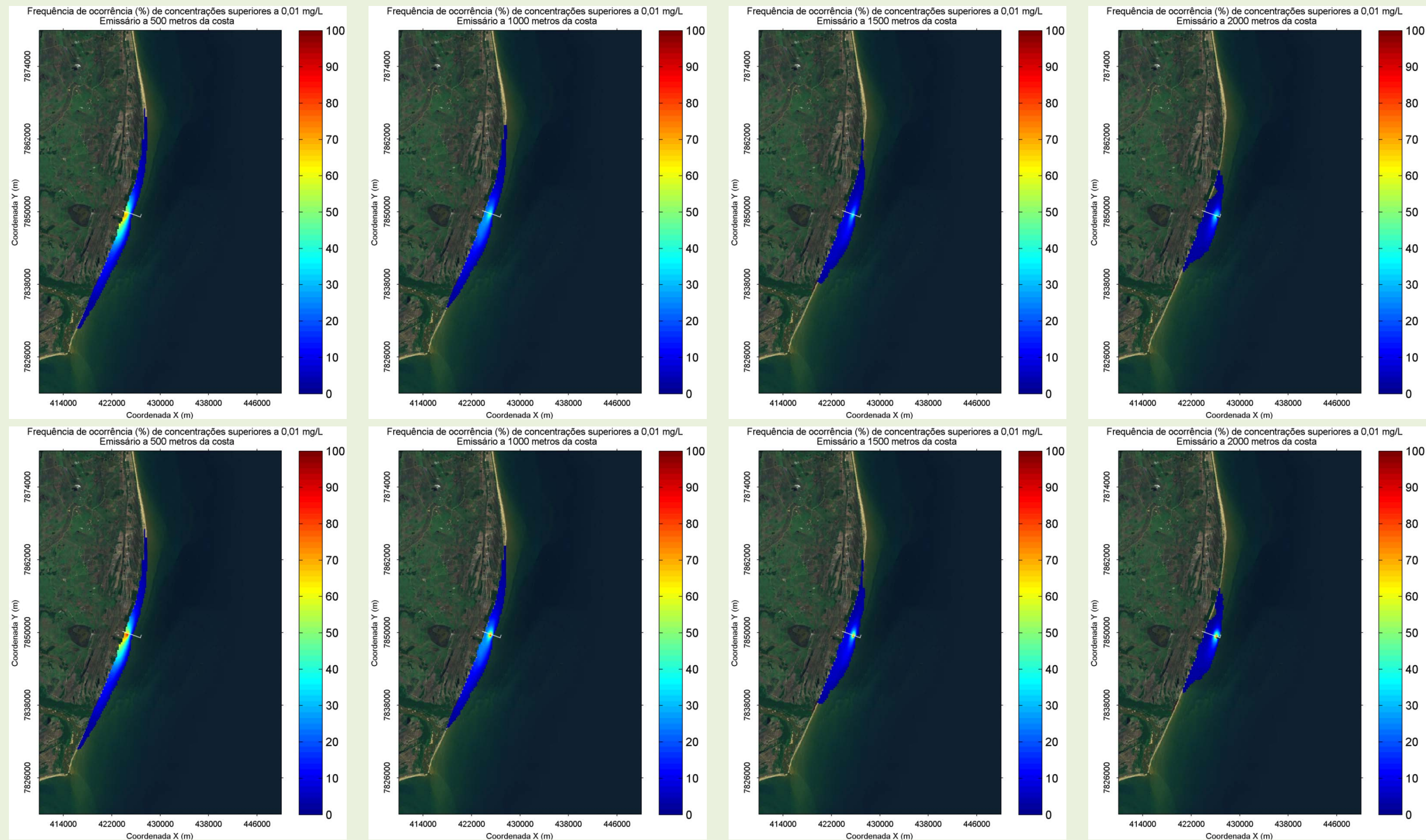


Figura 33: Frequência de ocorrência (%) das concentrações superiores a 0,01 mg/L do traçador conservativo nas camadas de superfície (figuras acima) e fundo (figuras abaixo) lançado a 500, 1000, 1500 e 2000 metros da costa no período de inverno.

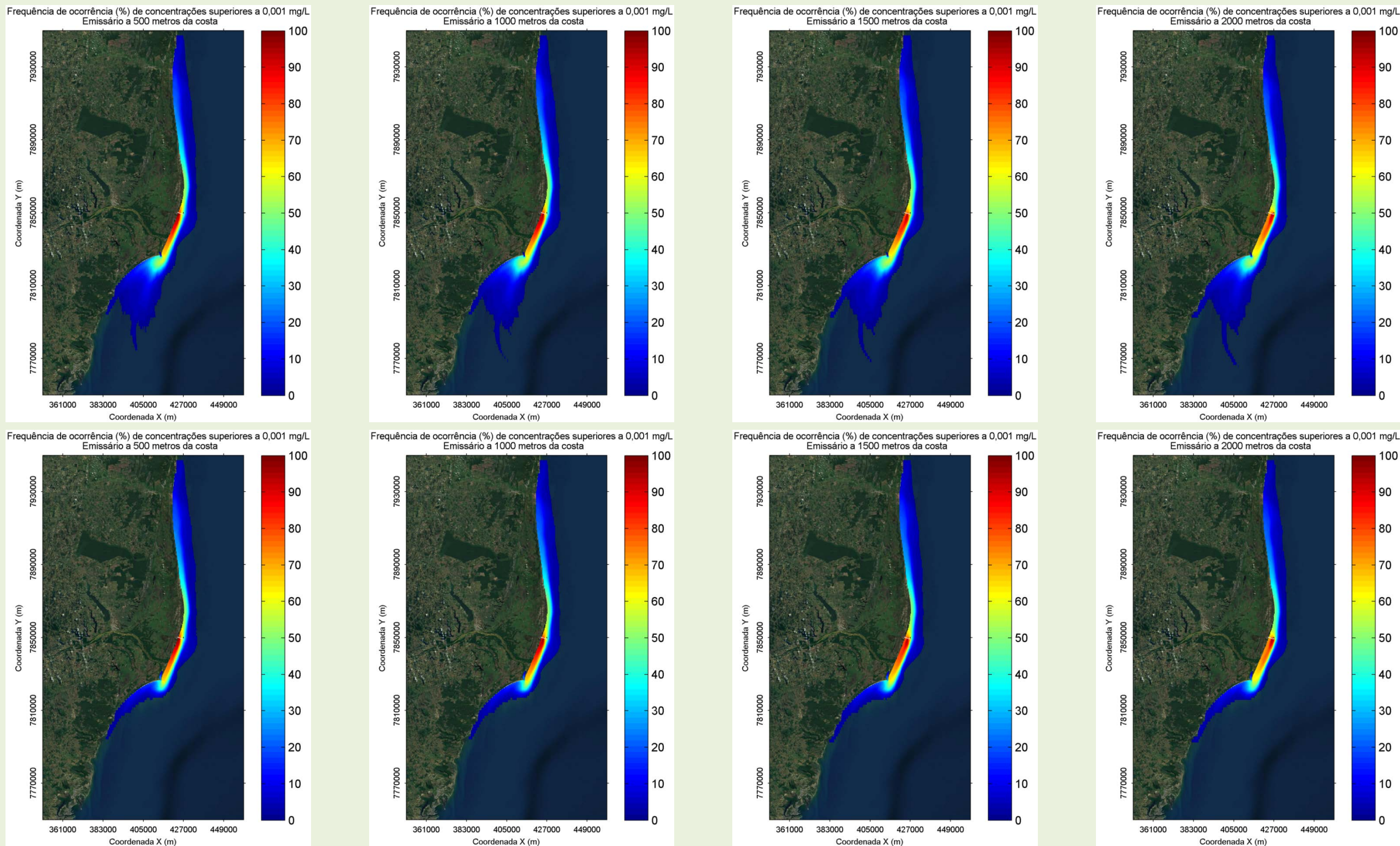


Figura 34: Frequência de ocorrência (%) das concentrações superiores a 0,001 mg/L do traçador conservativo nas camadas de superfície (figuras acima) e fundo (figuras abaixo) lançado a 500, 1000, 1500 e 2000 metros da costa no período de inverno.

A fim de avaliar a concentração instantânea para os diferentes cenários nas proximidades da costa, foram definidos oito pontos dispostos conforme Figura 35.

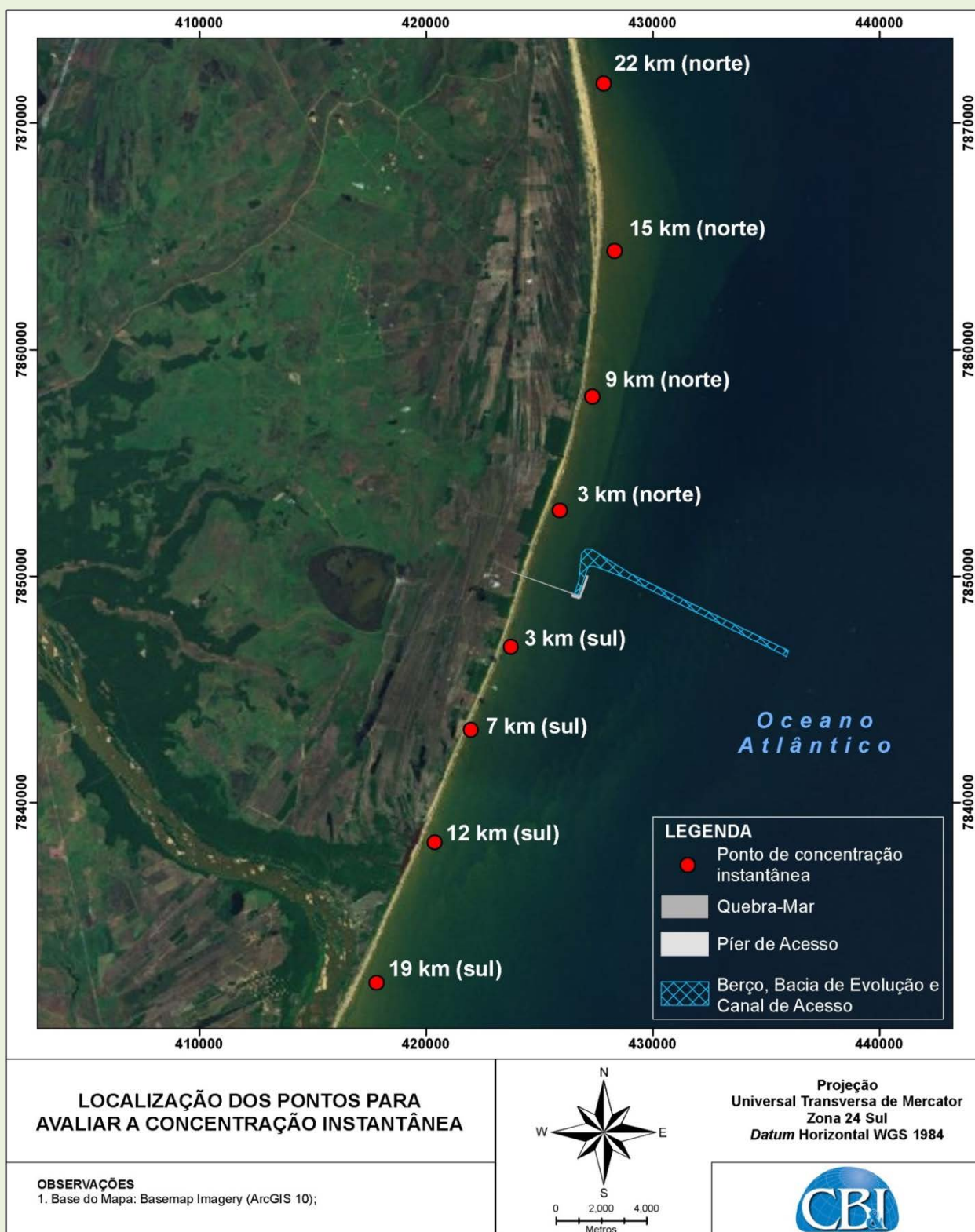
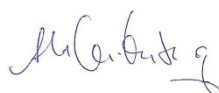


Figura 35: Localização dos pontos para avaliação das concentrações instantâneas.

As séries temporais da concentração instantânea do traçador conservativo para os cenários distantes de 500 e 2000 metros da costa podem ser observados na Figura 36.

Novamente, para todos os cenários, à medida que se afasta do ponto de lançamento os valores de concentração nos pontos próximos à costa tendem a diminuir.

Da mesma forma que para o verão, no período de inverno as concentrações nos pontos próximos à costa para o cenário de emissário mais próximo (500 m) não ultrapassam valores de 0,030 mg/L.



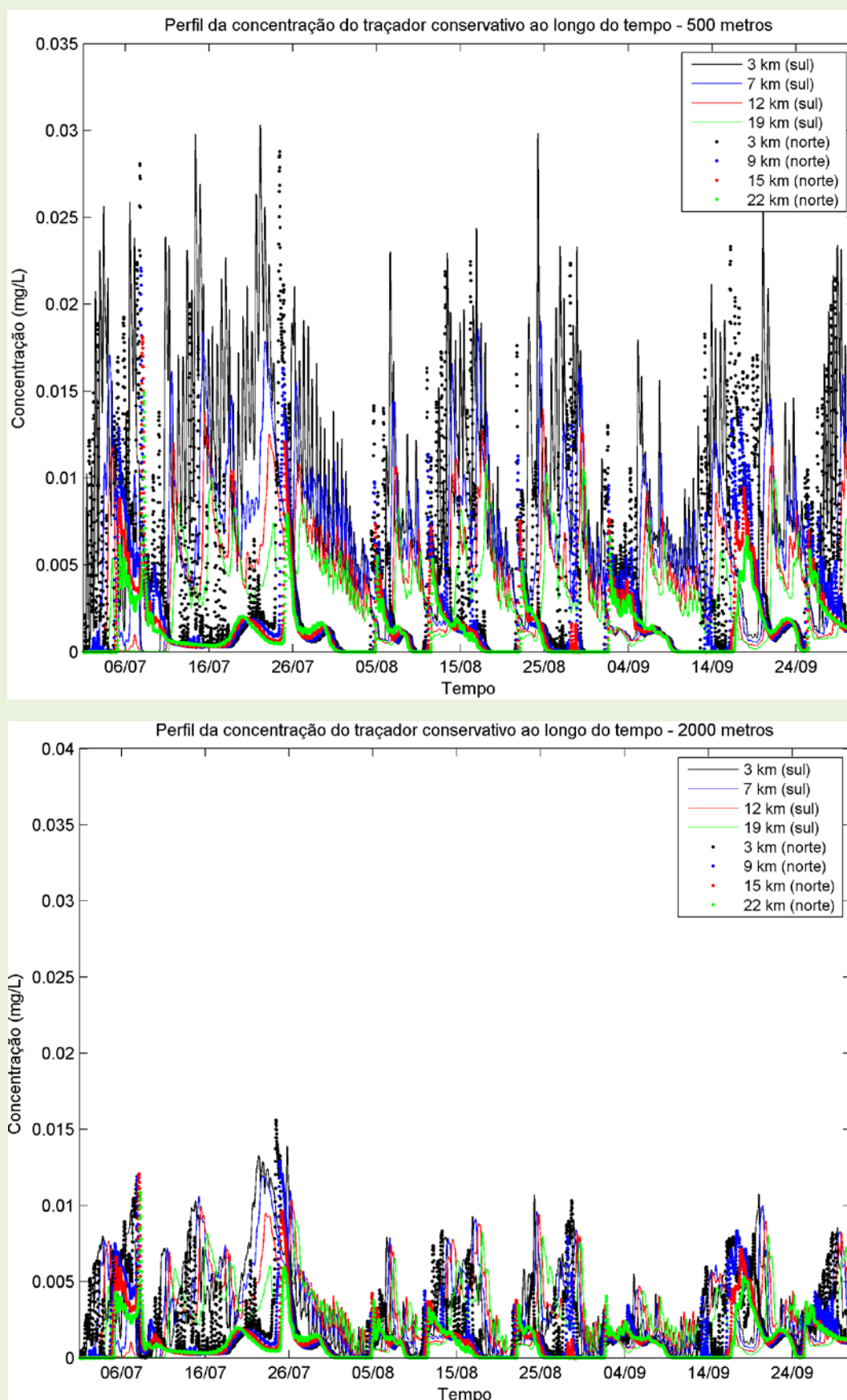


Figura 36: Perfis de concentração do traçador conservativo ao longo do tempo para os emissários a 500 e 2000 metros da costa no período de **inverno**.

4 Considerações Finais

O modelo Delft3D foi utilizado para avaliação do padrão de dispersão da pluma de efluentes no mar proveniente do emissário submarino. Foram simulados quatro pontos de descarga do emissário, estando cada um desses distanciados da costa em 500, 1000, 1500 e 2000 metros. Para simular o lançamento de efluentes pelo emissário, foi utilizado um traçador conservativo lançado na camada de fundo, com vazão constante de 1211 m³/h nos diferentes pontos locais. Embora o efluente a ser lançado seja tratado, foi utilizado de forma conservadora um efluente com concentração de 50 mg/L. Visto que o efluente será de água doce o modelo foi simulado com transporte de sal, utilizando-se salinidade de 36 g/kg nas fronteiras oceânicas.

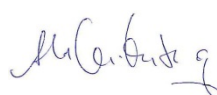
Foram avaliadas as concentrações médias ao longo do tempo de simulação das camadas de superfície e fundo, frequências de ocorrência de concentrações acima de 0,01mg/L e 0,001 mg/L, bem como as séries temporais de concentrações instantâneas em pontos próximos à costa.

De forma geral, a pluma do emissário tende a diminuir de dimensão quanto mais distante esse for lançado da costa, deslocando-se no verão para o sul e, durante o inverno, tanto para norte quanto para sul. A diferença de concentrações entre camada de superfície e de fundo foi verificada somente no inverno e observada na análise de frequência de ocorrência de concentrações superiores a 0,001 mg/L: na superfície, a pluma manteve seu sentido bidirecional, enquanto na camada de fundo esse sentido foi para norte, indicando que as correntes de superfície sofrem maiores variabilidades decorrente do efeito do vento. Os maiores valores de concentração nos pontos próximos à costa para o cenário de emissário mais próximo da costa (500 metros) foi de 0,030 mg/L, indicando uma capacidade de diluição de 1:1667.

Em decorrência do fato de que o efluente a ser descartado será previamente tratado, o emissário, disposto a 1000 ou a 1500 metros, já se mostra suficiente para proporcionar um efeito de diluição adequado para poluentes comuns de efluentes domésticos, como o DBO, por exemplo. No entanto, a concentração aceitável do efluente ainda deverá ser avaliada com base nas características dos poluentes e de sua toxicidade ao meio.

Equipe Técnica

Nome	Formação	Função	CTF - IBAMA	CREA/ AOCEANO
Alex Vieira Falkenberg	Engenheiro de Controle e Automação	Gerente de Projeto	5132601	PR-68434/D
Gustavo Hattenhauer Gomes	Oceanógrafo	Modelagem Numérica	5219554	1962
Patricia Puhl	Oceanógrafa	Modelagem Numérica	N/A	N/A




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.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.9p.
- 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 Dlobal Inverse Model. Journal of Geophysical Research, 99 (C12), 24821-24852.
- FEMAR, 2000. Catálogo De Estações Maregráficas Brasileiras, Folhas 159 e 160. 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

LUNEL T., 1993. Dispersion. Oil droplet Size Measurements at sea. pp 1023-1056. Proceedings 16th Arctic and Marine Oil Spill Technical Seminar. Environment Canadá.

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

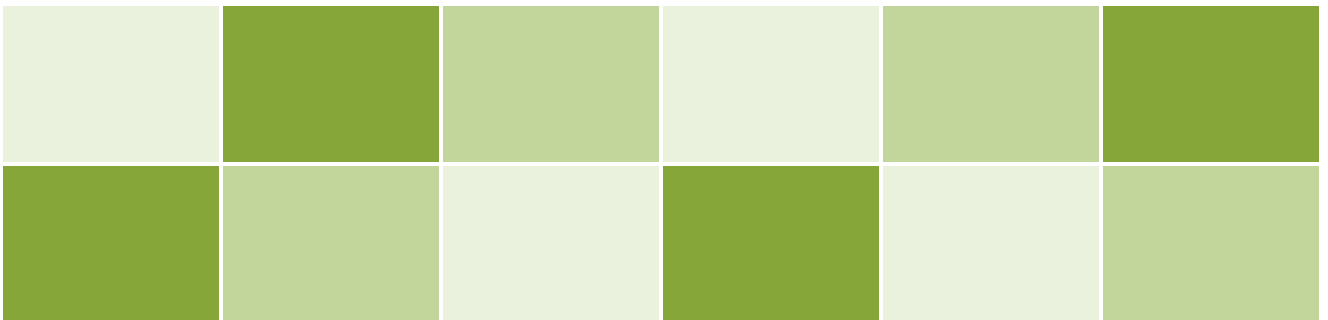
ROBERTS, P.J.W., SALAS, H.J., REIFF, F.M., LIBHABBER, M., LABBE, A., THOMSON, J.C., 2010. Marine Wastewater Outfalls And Treatment Systems. IWA Publishing, London, UK.

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

SOUZA, J.F.A., AZEVEDO, J.L.L., OLIVEIRA, L.R., SOARES, I.D., 2008. Emissários Submarinos – Uma Alternativa Para A Disposição Final De Efluentes Em Cidades Costeiras. SEMENGO, FURG, RS.

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

Modelagem Numérica Computacional das Condições Hidrodinâmicas, de Ondas, Transporte de Sedimentos e Mudanças Morfológicas como Subsídio ao Licenciamento Ambiental do Terminal Portuário da Manabi Mineração em Linhares - ES



Relatório Técnico – RT-ECV-005/13
Revisão 01 – Outubro/13

Sumário Executivo

A CB&I foi solicitada pela *Econservation Estudos e Projetos Ambientais* para realizar um estudo de modelagem numérica hidrodinâmica, de ondas, transporte de sedimentos, mudanças morfológicas, e estimativa de tempo para estabilização da linha de costa pós-obra como subsídio ao licenciamento ambiental do Terminal Portuário da Manabi Logística (TP Manabi), na praia de Cacimbas em Linhares/ES, localizado a 2500 m de distância da costa.

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. Foram avaliados os impactos causados pelas estruturas de apoio ao terminal portuário (canal de navegação, bacia de evolução, berços, quebra-mar, píer de acesso) na circulação hidrodinâmica, propagação de ondas desde offshore até a praia, no transporte de sedimentos, evolução morfológica para 1 e 5 anos e estimativa de estabilização de linha de costa.

Os resultados mostraram que a propagação de ondas dos quadrantes simulados (N, NE, E, SE, S, SSW) sofrerá alteração pelas estruturas do terminal. As ondas com direção de propagação oblíqua ao quebra-mar e canal de navegação, sofrerão alterações com maior extensão, para as direções norte e sul. O setor central da praia de Cacimbas (sombreada pelo quebra-mar) passará a receber ondas com menor altura e mostrou uma tendência progradante da linha de costa. Regiões a norte e a sul do empreendimento apresentaram aumento da altura de ondas.

Alterações na hidrodinâmica foram observadas, com maior magnitude para situação de maré de sizígia. As correntes predominantes na região são decorrentes da propagação da onda de maré, com sentido norte/sul paralelas a linha de costa. Para todos os cinco casos simulados, as estruturas do terminal modificaram a circulação hidrodinâmica local, principalmente pela presença do quebra-mar. Na praia de Cacimbas, a alteração na circulação ocorre devido à mudança na altura e direção de propagação das ondas. O quebra-mar gera zonas de sombra no lado oposto do sentido da corrente, seguidos por vórtices com diâmetro de 700 metros de comprimento. A velocidade das correntes no canal de navegação é de cerca de 1,0 m/s (2 nós) em situações normais, com sentido transversal ao canal. Em casos extremos essa corrente transversal pode alcançar 3 nós (1,5 m/s).

O comportamento geral do transporte de sedimentos está associado ao clima de ondas atuante e ocorre preferencialmente na zona de surfe da praia de Cacimbas. O transporte resultante variou de acordo com o caso de onda simulado, com orientação para sul ou para norte. Os casos mais energéticos, representados pelas ondulações dos quadrantes leste e sul apresentaram valores de transporte de 2 a 3 m³/m/h na zona de surfe. O caso caracterizado como evento extremo ou tempestades, apresentou valor de transporte de sedimentos de até 16 m³/m/h na zona de surfe. Com a presença do quebra-mar, ocorreu uma diminuição no transporte de 2 m³/m/h na região sombreada pela estrutura.

O modelo de evolução morfológica foi simulado para as situações após 01 ano e 05 anos da implantação do terminal portuário. Foram identificados três setores na praia de Cacimbas que sofrerão impacto direto das estruturas do terminal portuário: setor norte, central e sul.

Após 5 anos de simulação, o setor norte foi caracterizado como erosivo, apresentando recuo da linha de costa de 62 metros, e variação negativa do volume relativo de 488 m³/m em média. O setor central, caracterizado como acrescivo, progradiu 210 metros em direção ao mar, obtendo uma variação volumétrica relativa positiva de 307 m³/m em média. O setor sul apresentou padrões acrescivos, com variação volumétrica relativa negativa de 41 m³/m em média. As simulações mostraram que o ambiente apresentará uma evolução contínua desde a implantação do terminal até 5 anos, com uma maior celeridade da evolução da morfologia de fundo nos dois primeiros anos, tendendo a diminuir após este ano. A região do canal de navegação e quebra-mar também foi afetada. O padrão geral foi erosão do topo do talude no lado norte do canal de navegação e deposição da mesma magnitude na base do talude no lado sul do canal. O quebra-mar apresentou em suas três pontas (forma de L) tendência erosiva de 2 metros após cinco anos de simulação.

O transporte resultante de sedimentos após a implantação do terminal portuário, tanto nas simulações de 01 e 05 anos, manteve sentido sul para norte nos setores sul e central. No setor norte surgiu uma zona de reversão do transporte residual, com sentido norte para sul, devido à influência das estruturas (quebra-mar e canal de navegação). Esta zona de reversão faz com que o sedimento migre do setor norte para o setor central, favorecendo o acúmulo de sedimentos no setor central e a erosão no setor norte. Após o setor norte o transporte volta a ser sul para norte, sendo evidenciada uma zona de erosão onde há gradiente positivo de transporte.

No layout atual, as estruturas de apoio favorecem a formação de vórtices na bacia de evolução e correntes de través de 1 a 2 nós tanto na bacia de evolução como canal de acesso. Esta magnitude de correntes pode proporcionar perigos à navegação. Pelo ambiente em questão ser caracterizado como costa aberta aos processos oceanográficos, o clima de ondas local apresenta grandes ondas com longos períodos, associado a correntes longitudinais intensas, o que tende a dificultar a operação. Para isso é recomendada a aplicação de um modelo de agitação portuária (Boussinesq) para avaliar as taxas de operabilidade do terminal portuário, bem como realizar um estudo de navegabilidade com intuito de averiguar se o canal de navegação é adequado ao navio sob as diversas condições hidrodinâmicas, analisar a viabilidade das manobras na bacia de evolução, bem como das manobras de atracação e desatracação.

Avaliando a sedimentação ocorrida no canal de navegação, estimou-se o período de dragagem do canal baseado no tempo de operação do terminal em um ano. Sugere-se que o canal de navegação seja dragado a até cada 2 anos, para que não comprometa significativamente a operabilidade do terminal, compreendendo um volume aproximado de até 284.000 m³. Com relação à erosão causada na base do quebra-mar, sugere-se a utilização de alguma tecnologia como forma de mitigação deste processo, que alcançou erosão aproximada entre 4 e 5 metros em 5 anos.

A análise de estabilização da linha de costa pós-obra compreendeu um período de 30 anos. Foi observada uma área de erosão na porção norte da área de estudo e uma área de deposição na porção central (em frente ao futuro terminal). As maiores taxas de progradação ocorreram nos quatro primeiros anos (37,5 m/ano), havendo uma redução gradual nessa taxa até 14 anos, onde manteve-se constante com 12,5 m/ano até 30 anos. A retração da linha de costa na porção norte da área de estudo manteve-se em uma taxa constante entre 2 e 30 anos pós obra, erodindo 10 m/ano.

O modelo morfológico de estabilização da linha de costa foi considerado conservador, apontando máximos valores de erosão considerando uma costa totalmente arenosa e sem presença de vegetação. Após 30 anos, o setor central acresceu 480 metros e o setor norte erodiu 250 metros. Sugere-se o monitoramento da linha de costa por perfis topobatimétricos (porções aéreas e subaéreas da praia) durante e após a conclusão das obras. Caso ocorram diferenças excessivas com relação aos resultados apontados, o modelo numérico deve ser revisitado e calibrado utilizando os dados medidos em campo pelo monitoramento.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 DESCRIÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	15
2 CARACTERIZAÇÃO OCEANOGRÁFICA E METEOROLÓGICA	18
2.1 MARÉ.....	18
2.1.1 BANCO DE ABROLHOS E PROPAGAÇÃO DA ONDA DE MARÉ	20
2.1 VENTOS.....	22
2.2 ONDAS EM ÁGUAS PROFUNDAS.....	25
3 MODELOS NUMÉRICOS.....	31
3.1 MODELO HIDRODINÂMICO <i>DELFT3D-FLOW</i>	31
3.2 MODELO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS <i>SWAN</i>	31
3.3 MODELO MORFOLÓGICO <i>DELFT3D-MOR</i>	32
3.3.1 MODELAGEM DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E MORFOLOGIA.....	32
3.4 GRADES NUMÉRICAS.....	33
3.5 BATIMETRIA	35
3.6 DEFINIÇÃO DOS CASOS PROPAGADOS NO MODELO DE ONDAS	41
3.6.1 ONDAS EM AGUAS RASAS – MÉTODO DO HIPERCUBO.....	42
3.6.2 REDUÇÃO DOS DADOS DE ONDAS	50
3.6.3 MARÉ SIMPLIFICADA	52
3.6.4 TÉCNICA DE ACELERAÇÃO MORFOLÓGICA	53
3.7 DADOS PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO	54
3.7.1 MARÉ.....	56
3.7.2 VENTOS	57
3.7.3 ONDAS.....	58
3.8 DADOS PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO MORFOLÓGICO.....	59
3.9 ATENUAÇÃO DA CORRENTE POR ESTRUTURAS DE APOIO.....	63
3.10 MODELO MORFOLÓGICO DA ESTABILIZAÇÃO DA LINHA DE COSTA PÓS-OBRA.....	63
4 RESULTADOS.....	65

4.1 CALIBRAÇÃO	65
4.1.1 CALIBRAÇÃO DE NÍVEL (MARÉ)	65
4.1.2 CALIBRAÇÃO DE CORRENTES	67
4.1.3 CALIBRAÇÃO DE ONDAS	67
4.1.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO MORFOLÓGICO	68
CALIBRAÇÃO PELA LINHA DE COSTA	68
CALIBRAÇÃO PELA VARIAÇÃO DO VOLUME PRAIAL	71
4.2 AVALIAÇÃO DO IMPACTO HIDRODINÂMICO	72
4.2.1 ONDAS	73
4.2.2 CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA	81
4.3 AVALIAÇÃO DO IMPACTO MORFODINÂMICO	91
4.3.1 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	91
4.3.2 MORFOLOGIA	95
AVALIAÇÃO DE IMPACTO APÓS 01 ANO DE SIMULAÇÃO	95
AVALIAÇÃO DE IMPACTO APÓS 05 ANOS DE SIMULAÇÃO	101
4.4 TAXA DE SEDIMENTAÇÃO E PROJEÇÃO DE DRAGAGEM	109
4.5 MODELAGEM MORFOLÓGICA DE ESTABILIZAÇÃO DA LINHA DE COSTA	113
4.6 BASE TEÓRICA SOBRE EVOLUÇÃO DA FORMA EM PLANTA	119
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	123
6 REFERÊNCIAS	126

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Localização da área de estudo.</i>	16
<i>Figura 2: Arranjo offshore do terminal portuário Manabi. Fonte: Planave S/A. Planta: Arranjo Offshore e Área de Dragagem – Plantas e Seções.</i>	17
<i>Figura 3 Constantes de Maré para a estação maregráfica de Barra do Rio Doce - ES.</i>	19
<i>Figura 4: Séries de maré reconstruídas a partir das principais constantes harmônicas da FEMAR para Mucuri e Barra do Rio Doce.</i>	20
<i>Figura 5: Calibração de nível do modelo do Banco de Abrolhos.</i>	21
<i>Figura 6: 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>	21
<i>Figura 7: Dados medidos em campo de nível do mar e componente 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>	22
<i>Figura 8 (A) Rosa de ventos gerada a partir dos dados do modelo WW3 na coordenada 37°30' S, 19° O, para o período entre 1979 e 2009. (B) Diagrama Direcional de frequência relativa dos ventos do modelo WW3 para o mesmo ponto e período de tempo.</i>	23
<i>Figura 9: Localização dos dados de onda utilizados para caracterização.</i>	26
<i>Figura 10 (A) Rosa de altura significativa de ondas em águas profundas (H_s) gerada a partir dos dados do modelo WW3 na coordenada 37°30' S, 19° O, para o período entre 1979 e 2009. (B) Diagrama Direcional de frequência relativa das alturas significativas de ondas do modelo WW3 para o mesmo ponto e período.</i>	27
<i>Figura 11: Fluxograma esquemático do modelo Delft3D-Mor utilizado neste trabalho.</i>	32
<i>Figura 12: Grade numérica utilizada no modelo morfológico. Em preto a localização do futuro terminal portuário.</i>	34
<i>Figura 13: Grade numérica local utilizada no modelo hidrodinâmico e morfológico.</i>	35
<i>Figura 14 Cartas náuticas utilizadas para digitalização dos valores de profundidade. Cartas (a) 70, (b) 1400, (c) 22800, (d) 1420.</i>	36
<i>Figura 15: Pontos de batimetria obtidos pelo levantamento batimétrico efetuado nas proximidades do futuro terminal portuário – Linhares - ES. Batimetria cedida pela empresa Econservation (dados referenciados verticalmente ao nível médio do mar – N.M.).</i>	37
<i>Figura 16: Batimetria interpolada e projetada na grade numérica regional do modelo de ondas a partir do módulo Delft3D-QUICKIN (dados referenciados verticalmente ao nível médio do mar – N.M.).</i>	38
<i>Figura 17: Batimetria interpolada e projetada na grade numérica intermediária do modelo de ondas a partir do módulo Delft3D-QUICKIN (dados referenciados verticalmente ao nível médio do mar – N.M.).</i>	39

<i>Figura 18: Batimetria utilizada no modelo morfológico. Profundidades em metros abaixo do nível médio do mar.</i>	40
<i>Figura 19: Batimetria utilizada no modelo morfológico no cenário com alternativa. Profundidades em metros acima do nível médio do mar.</i>	41
<i>Figura 20: Esquema do método do hipercubo, que permite obter os parâmetros de onda no ponto de estudo para um dado estado de mar (H_{si}, T_{pi} e Dir_i), a partir da interpolação dos resultados da propagação de casos com diferentes combinações de H_s, T_p e Dir.</i>	42
<i>Figura 21: Casos de ondas ($Dir \times H_s$) selecionados para as propagações de ondas (pontos vermelhos).</i>	43
<i>Figura 22: Casos de ondas ($Dir \times T_p$) selecionados para as propagações das ondas (pontos vermelhos).</i>	43
<i>Figura 23: Casos de ondas ($Dir \times T_p \times H_s$) selecionados para as propagações de ondas (pontos vermelhos).</i>	44
<i>Figura 24: Localização do ponto onde foram extraídos os dados de onda de águas rasas.</i>	45
<i>Figura 25: (A) Rosa direcional de H_s em 20 metros de profundidades. (B) Diagrama direcional de H_s em 20 m de profundidade, em frente à área de estudo.</i>	46
<i>Figura 26: Intervalo de direções em águas profundas que cobrem 95% da energia observada na praia.</i>	50
<i>Figura 27: Classes selecionadas pelo método do fluxo de energia e casos representativos de cada classe (pontos vermelhos).</i>	51
<i>Figura 28: Série de maré simplificada adotada nas simulações morfodinâmicas. Figura superior corresponde as séries forçadas nas fronteiras norte e sul da grade numérica. Figura inferior corresponde a série adotada na simulação morfológica, resultante da soma das duas séries.</i>	53
<i>Figura 29: Localização onde foi instalado o ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) para calibração do modelo hidrodinâmico.</i>	55
<i>Figura 30: Previsão de maré dos pontos ao norte e sul da grade numérica, representando a diferença de nível entre as duas localidades.</i>	57
<i>Figura 31: Série de ventos do modelo CFSR utilizada no modelo de calibração. Linha sólida em preto corresponde a magnitude e os vetores representam a direção. As cores dos vetores também representam a magnitude, sendo azul valores menores e vermelho valores maiores.</i>	58
<i>Figura 32: Série de ondas do modelo WaveWatchIII utilizada no modelo de calibração.</i>	59
<i>Figura 33: Grade numérica local utilizada no modelo morfodinâmico com destaque para os perfis praias disponibilizados pela contratante (em azul os perfis referentes ao inverno; em vermelho os referentes ao verão; em preto a isóbata de 0 metros; em branco as estruturas do terminal portuário)</i>	60
<i>Figura 34: Mediana do sedimento marinho superficial. Dados disponibilizados pela Econservation.</i>	61
<i>Figura 35: Porcentagem de areia fina (acima) e silte (abaixo) nas amostra de sedimento marinho superficial. Dados disponibilizados pela Econservation.</i>	62
<i>Figura 36: Comparação entre nível de água medido e nível simulado pelo modelo numérico.</i>	66

<i>Figura 37: Comparação entre corrente medida e corrente simulada pelo modelo numérico.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 38: Comparação entre dados de onda medidos e simulados pelo modelo numérico.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 39: Retração e progradação da linha de costa nos perfis medidos e modelados para o período entre agosto de 2012 e janeiro de 2013, em MSL e MHW.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 40: Esquema exemplificando a variação de volume entre dois perfis (um no tempo 1 e outro após determinado período de tempo).....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 41: Variação do volume (m³/m) nos perfis medidos e modelados para o período entre agosto de 2012 e janeiro de 2013, em MSL.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 42: Diferença de altura significativa de ondas na isóbata de 9 metros ao longo da praia de Cacimbas representada pela grade numérica de ondas. (A) Caso 01, (B) Caso 02, (C) Caso 03, (D) Caso 04, (E) Caso 05. Linha sólida em preto representa o cenário atual e linha sólida em vermelho representa o cenário com o terminal. A linha em azul no quadro esquerdo representa a isóbata de 9 metros.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 43: (Esquerda) Campo de ondas propagado para o Caso 01, no Cenário Atual. (Centro) Campo de ondas propagado para o Caso 01, no Cenário com Alternativa. (Direita) Diferença de Hs para o Caso 01 entre os dois Cenários. As cores em vermelho correspondem maiores alturas e em azul, menores. Os vetores em preto representam a direção da onda. As isolinhas na figura da direita correspondem à mesma diferença de Hs, a cada 0,5 metros.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 44: (Esquerda) Campo de ondas propagado para o Caso 02, no Cenário Atual. (Centro) Campo de ondas propagado para o Caso 02, no Cenário com Alternativa. (Direita) Diferença de Hs para o Caso 02 entre os dois Cenários. As cores em vermelho correspondem maiores alturas e em azul, menores. Os vetores em preto representam a direção da onda. As isolinhas na figura da direita correspondem à mesma diferença de Hs, a cada 0,5 metros.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 45: (Esquerda) Campo de ondas propagado para o Caso 03, no Cenário Atual. (Centro) Campo de ondas propagado para o Caso 03, no Cenário com Alternativa. (Direita) Diferença de Hs para o Caso 03 entre os dois Cenários. As cores em vermelho correspondem maiores alturas e em azul, menores. Os vetores em preto representam a direção da onda. As isolinhas na figura da direita correspondem à mesma diferença de Hs, a cada 0,5 metros.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 46: (Esquerda) Campo de ondas propagado para o Caso 04, no Cenário Atual. (Centro) Campo de ondas propagado para o Caso 04, no Cenário com Alternativa. (Direita) Diferença de Hs para o Caso 04 entre os dois Cenários. As cores em vermelho correspondem maiores alturas e em azul, menores. Os vetores em preto representam a direção da onda. As isolinhas na figura da direita correspondem à mesma diferença de Hs, a cada 0,5 metros.....</i>	<i>79</i>

<i>Figura 47: (Esquerda) Campo de ondas propagado para o Caso 05, no Cenário Atual. (Centro) Campo de ondas propagado para o Caso 05, no Cenário com Alternativa. (Direita) Diferença de Hs para o Caso 05 entre os dois Cenários. As cores em vermelho correspondem maiores alturas e em azul, menores. Os vetores em preto representam a direção da onda. As isolinhas na figura da direita correspondem à mesma diferença de Hs, a cada 0,5 metros.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 48: Velocidades máximas de corrente obtidas para o Caso 03 em condições de quadratura (A), e sizígia (B). O caso 03 foi escolhido por representar um caso de onda frequente na localidade. As isolinhas representam mesma magnitude de corrente, a cada 0,5 m/s.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 49: Diferença no campo de correntes entre o Cenário Atual e Cenário com Alternativa, para o Caso 01. (A) Quadratura, (B) Sizígia.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 50: Diferença no campo de correntes entre o Cenário Atual e Cenário com Alternativa, para o Caso 02. (A) Quadratura, (B) Sizígia.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 51: Diferença no campo de correntes entre o Cenário Atual e Cenário com Alternativa, para o Caso 03 (A) Quadratura, (B) Sizígia.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 52: Diferença no campo de correntes entre o Cenário Atual e Cenário com Alternativa, para o Caso 04 (A) Quadratura, (B) Sizígia.</i>	<i>87</i>
<i>Figura 53: Diferença no campo de correntes entre o Cenário Atual e Cenário com Alternativa, para o Caso 05 (A) Quadratura, (B) Sizígia.</i>	<i>88</i>
<i>Figura 54: Campo de correntes em sizígia. (A) Caso 01, (B) Caso 02.</i>	<i>89</i>
<i>Figura 55: Campo de correntes em sizígia. (A) Caso 03, (B) Caso 04.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 56: Campo de correntes em sizígia, para o Caso 05.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 57: Transporte residual de sedimentos para o Cenário Atual (Esquerda), Cenário com Alternativa (Centro) e diferença no transporte residual entre os dois cenários (Direita). Quadro superior representa o Caso 01 e quadra inferior o Caso 02. Vetores indicam a direção do transporte e cores a magnitude.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 58: Transporte residual de sedimentos para o Cenário Atual (Esquerda), Cenário com Alternativa (Centro) e diferença no transporte residual entre os dois cenários (Direita). Quadro superior representa o Caso 03 e quadra inferior o Caso 04. Vetores indicam a direção do transporte e cores a magnitude.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 59: Transporte residual de sedimentos para o Cenário Atual (Direita) e Cenário com Alternativa (Esquerda) após 01 ano de simulação. Valores de volume expressos em m³/m/ano.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 60: Transporte residual de sedimentos para o Cenário Atual (Direita) e Cenário com Alternativa (Esquerda) após 01 ano de simulação, em maior detalhe. Valores de volume expressos em m³/m/ano. Figura com zoom na região de reversão do transporte. Vetores indicam a direção do transporte.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 61: Evolução morfológica após um (01) ano no Cenário Atual (Direita) e Cenário com Alternativa (Esquerda). Cores representam a variação morfológica em metros.</i>	<i>99</i>

<i>Figura 62: (A) Diferença na evolução morfológica após um (01) ano de simulação entre o Cenário Atual e Cenário com Alternativa. (B) Mudança de volume (m^3/m) no perfil praial comparando os dois cenários, ao longo da grade numérica. (C) Diferença de volume (m^3/m) entre os dois cenários ao longo da grade numérica.</i>	<i>100</i>
<i>Figura 63: Delimitação dos setores com variação volumétrica (Sul, Central e Norte) e localização dos perfis praias apresentados na Figura 64.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 64: Perfil praial da berma até a profundidade de fechamento para o setor central (Acima) e setor norte (Abaixo) após cinco anos de simulação. Linha preta representa o Cenário Atual e vermelha o Cenário com Alternativa. Linha tracejada é o Nível Médio do Mar.</i>	<i>103</i>
<i>Figura 65: Transporte residual de sedimentos para o Cenário Atual (Direita) e Cenário com Alternativa (Esquerda) após 05 anos de simulação. Valores de volume expressos em $m^3/m/ano$.</i>	<i>105</i>
<i>Figura 66: Transporte residual de sedimentos para o Cenário Atual (Direita) e Cenário com Alternativa (Esquerda) após 05 anos de simulação. Valores de volume expressos em $m^3/m/ano$. Figura com zoom na região de reversão do transporte. Vetores indicam a direção do transporte.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 67: Evolução morfológica após cinco anos no Cenário Atual (Direita) e Cenário com Alternativa (Esquerda). Cores representam a a variação morfológica em metros.</i>	<i>107</i>
<i>Figura 68: (A) Diferença na evolução morfológica após um (01) ano de simulação entre o Cenário Atual e Cenário com Alternativa. (B) Mudança de volume (m^3/m) no perfil praial comparando os dois cenários, ao longo da grade numérica. (C) Diferença de volume (m^3/m) entre os dois cenários ao longo da grade numérica.</i>	<i>108</i>
<i>Figura 69 - Esquema de definição da profundidade necessária (h_N) e da profundidade disponível (h_D). Modificado de Lomónaco e Medina (2005).</i>	<i>110</i>
<i>Figura 70: Sedimentação (cores quentes) e erosão (cores frias) ocorrida no canal de navegação, bacia de evolução e berço após 01 ano. Valores expressos em metros.</i>	<i>111</i>
<i>Figura 71: Sedimentação (cores quentes) e erosão (cores frias) ocorrida no canal de navegação, bacia de evolução e berço após 02 anos. Valores expressos em metros.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 72: Sedimentação (cores quentes) e erosão (cores frias) ocorrida no canal de navegação, bacia de evolução e berço após 03 anos. Valores expressos em metros.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 73: Sedimentação (cores quentes) e erosão (cores frias) ocorrida no canal de navegação, bacia de evolução e berço após 04 anos. Valores expressos em metros.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 74: Sedimentação (cores quentes) e erosão (cores frias) ocorrida no canal de navegação, bacia de evolução e berço após 05 anos. Valores expressos em metros.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 75: Perfis praias criados ao longo da grade local (em vermelho os pontos iniciais e finais de cada perfil criado; em branco a isóbata de 0 metros; em preto as estruturas do terminal portuário)</i>	<i>114</i>

<i>Figura 76: Evolução da linha de costa ao longo dos anos na área de estudo – erosão e deposição.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 77: Evolução da linha de costa ao longo dos anos na porção central (em amarelo) e na porção norte (em vermelho).....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 78: A. perfis criados ao longo da grade local; B. variação da linha de costa a cada período de tempo (em metros); C. retração e progradação da linha de costa ao longo dos 30 anos (em metros).</i>	<i>118</i>
<i>Figura 79. Desenho esquemático das variáveis utilizadas nas formulações de Dally e Pope (1986), Pope e Dean (1986) e Ahrens e Cox (1990).</i>	<i>120</i>
<i>Figura 80. Desenho esquemático das variáveis da equação parabólica (modificado de Hsu e Evans, 1989).</i>	<i>121</i>
<i>Figura 81. Previsão da linha de costa futura pelo modelo parabólico com a presença do quebra-mar.</i>	<i>122</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.....	20
Tabela 2: Resumo da caracterização de ondas feita por Pianca (2010) para a região do presente estudo.....	25
Tabela 3: Cartas náuticas utilizadas e suas escalas.	36
Tabela 4: Características dos casos de ondas selecionados e seus respectivos fatores de aceleração morfológica (<i>morfac</i>).....	52
Tabela 5: Parâmetros de calibração do modelo hidrodinâmico.....	55
Tabela 6 – Coordenadas geográficas dos pontos de maré extraídos do modelo <i>TMD</i>	56
Tabela 7 – Componentes harmônicas da maré do modelo <i>TMD</i> utilizadas na simulação numérica.	56
Tabela 8: Características dos casos de ondas selecionados e seus respectivos fatores de aceleração morfológica (<i>morfac</i>) para o modelo de estabilização da linha de costa.	64
Tabela 9: Parâmetros de calibração do modelo morfológico.	69
Tabela 10 – Casos de ondas propagados para avaliar efeito da implantação do terminal portuário.	73
Tabela 11: Volumes de sedimentação (m ³) calculados.	109
Tabela 12: Mínimas profundidades encontradas nos três setores a cada ano. Valores expressos em relação ao nível de redução da DHN.	109
Tabela 13: Porcentagem de operabilidade do terminal em um ano baseado na sedimentação ocorrente no canal de navegação.	110
Tabela 14. Características e respostas estimadas para o quebra-mar do terminal portuário Manabi.	119

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Diagrama de distribuição conjunta de intensidade e direção dos ventos (janeiro de 1979 a dezembro de 2009) – convenção meteorológica.....	24
Quadro 2: Diagrama de ocorrência conjunta de altura significativa (H_s), em metros, e direção de ondas (Dir), em graus, gerado a partir dos dados do modelo WWIII.	28
Quadro 3: Diagrama de ocorrência conjunta de período de pico (T_p), em segundos, e direção de ondas (Dir), em graus, gerado a partir dos dados do modelo WWIII.	29
Quadro 4: Diagrama de ocorrência conjunta de altura significativa (H_s), em metros, e período de pico (T_p), em segundos, gerado a partir dos dados do modelo WWIII.	30
Quadro 5: Diagrama de ocorrência conjunta de altura significativa (H_s) e direção de ondas (Dir) gerado a partir dos dados propagados com o modelo SWAN e reconstruídos com o método do Hipercubo.	47
Quadro 6: Diagrama de ocorrência conjunta de período de pico (T_p) e direção de ondas (Dir) gerado a partir dos dados propagados com o modelo SWAN e reconstruídos com o método do Hipercubo.	48
Quadro 7: Diagrama de ocorrência conjunta de altura significativa (H_s) e período de pico (T_p) gerado a partir dos dados propagados com o modelo SWAN e reconstruídos com o método do Hipercubo.	49

1 Introdução

A CB&I foi solicitada pela *Econservation Estudos e Projetos Ambientais* para realizar um estudo de modelagem numérica hidrodinâmica, de ondas, transporte de sedimentos, mudanças morfológicas, e estimativa de tempo para estabilização da linha de costa pós-obra como subsídio ao licenciamento ambiental do Terminal Portuário da Manabi Logística, no município de Linhares/ES.

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. Na zona de surfe os sedimentos são predominantemente arenosos.

O arranjo *offshore* do terminal portuário é apresentado na Figura 2. O arranjo offshore é configurado com canal de navegação com 9,3 km de comprimento e profundidade de 22,5 metros (DHN), bacia de evolução com 628 metros de diâmetro com profundidade de 21 metros (DHN) e berço com profundidade igual a 20 metros (DHN). Acesso à parte *onshore* é caracterizado com ponte de acesso de 2500 metros de comprimento e quebra-mar em formato L, com 1000 metros de extensão no eixo maior e 320 metros no eixo menor.

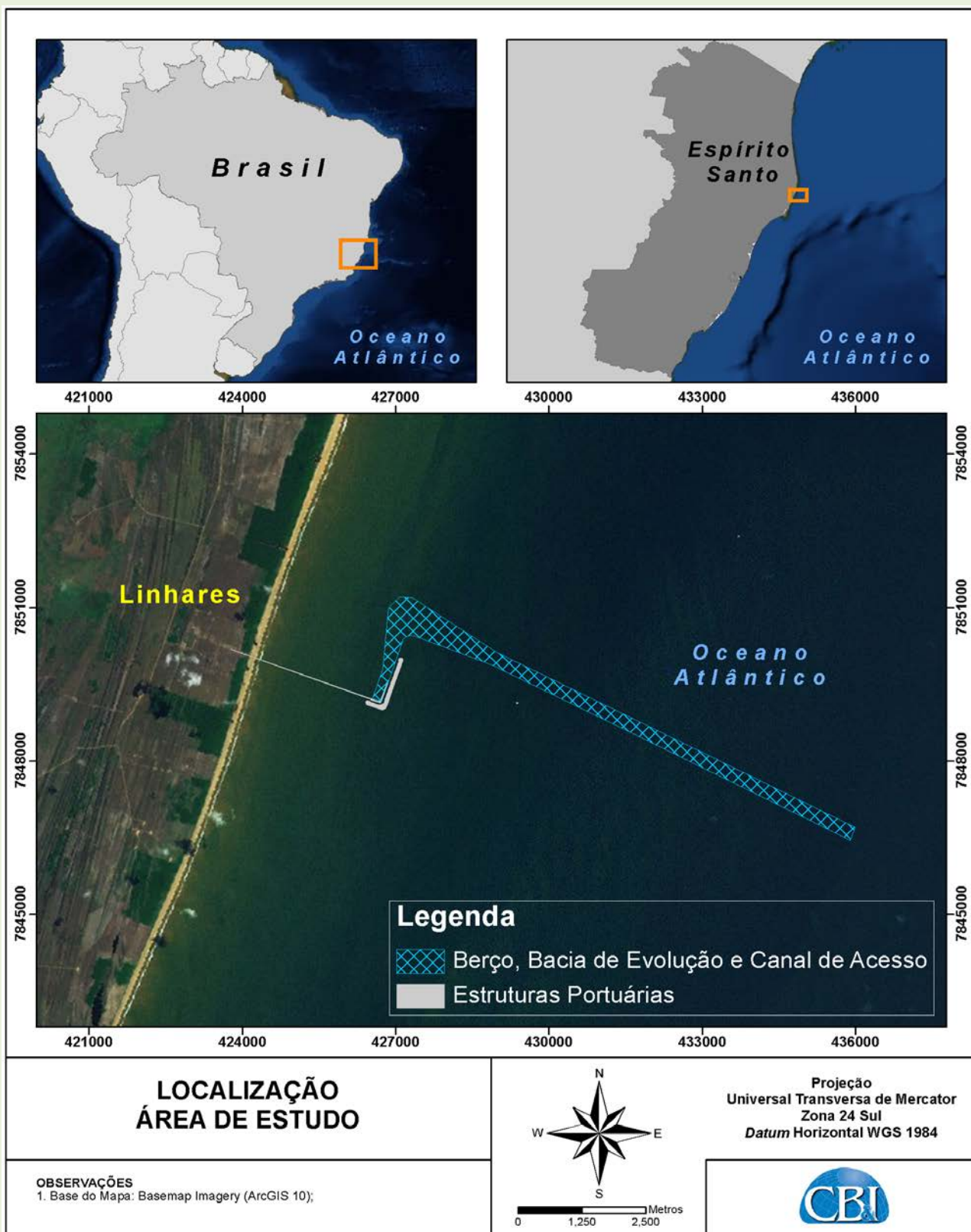


Figura 1: Localização da área de estudo.

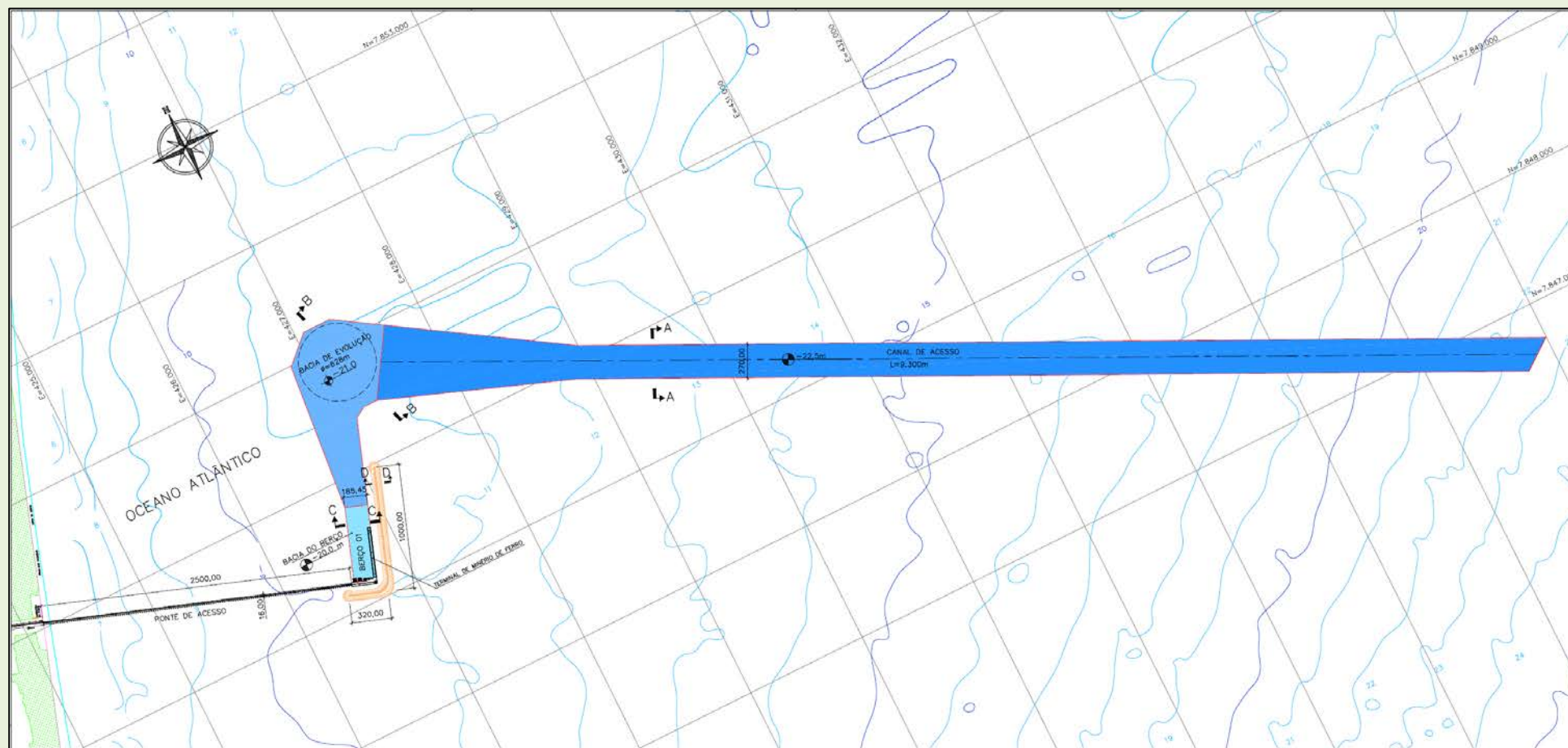


Figura 2: Arranjo offshore do terminal portuário Manabi. Fonte: Planave S/A. Planta: Arranjo Offshore e Área de Dragagem – Plantas e Seções.

2 Caracterização Oceanográfica e Meteorológica

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

2.1 MARÉ

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 é de 1,25 m e 0,09 m respectivamente acima do nível de referência, estando este a 0,67 m abaixo do nível médio do mar.

A maré na estação Barra do Rio Doce, é caracterizada como semidiurna, 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 3 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 3 Constantes de Maré para a estação maregráfica de Barra do Rio Doce - ES.

2.1.1 Banco de Abrolhos e Propagação da Onda de Maré

A plataforma continental do litoral do Espírito Santo e sul da Bahia apresenta recortes diferentes de qualquer outro local no litoral brasileiro, sendo 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 onda de maré. Estes efeitos estão registrados nas fichas das estações maregráficas disponibilizadas pela FEMAR para Mucuri (região central do banco) e Barra do rio Doce (extremo Sul), mostradas na Tabela 1. 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 4 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

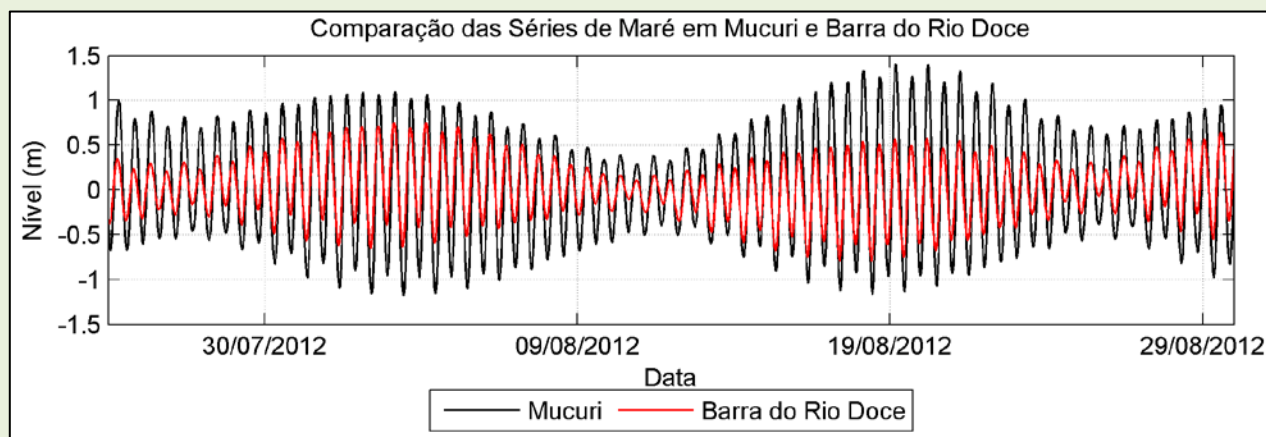


Figura 4: Séries de maré reconstruídas a partir das principais constantes harmônicas da FEMAR para Mucuri e Barra do Rio Doce.

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 lâmina d'água 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 5.

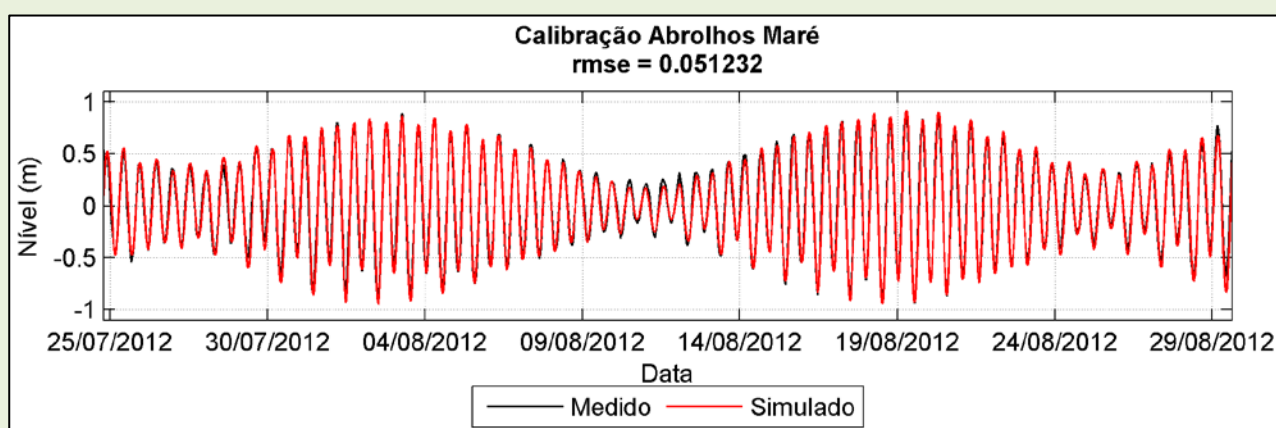


Figura 5: Calibração de nível do modelo do Banco de Abrolhos.

A Figura 6 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 7). Desta maneira, a maré é o principal agente gerador das correntes ao longo da costa em Linhares.

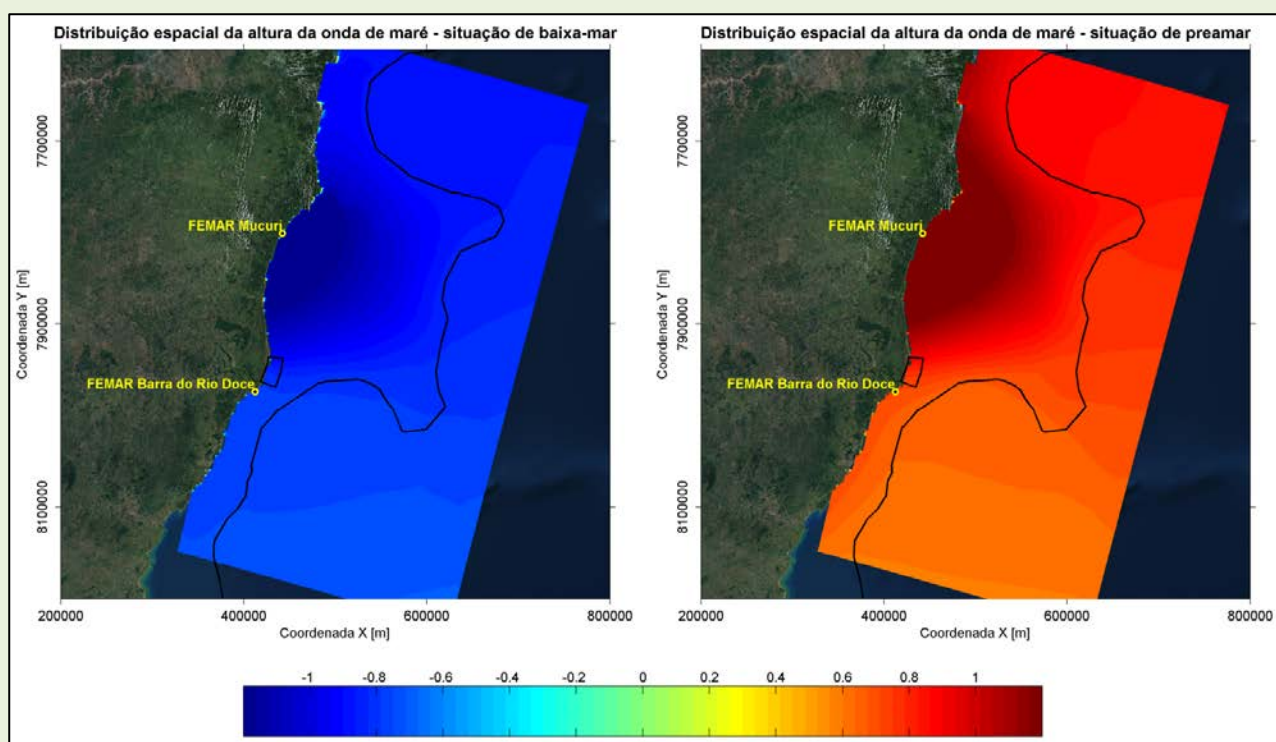


Figura 6: Variação espacial do nível de água na região do banco de Abrolhos. (A) Situação de baixa-mar, (B) Situação de preamar. As linhas pretas representam os limites do Banco de Abrolhos e a grade hidrodinâmica utilizada no modelo Delft3D.

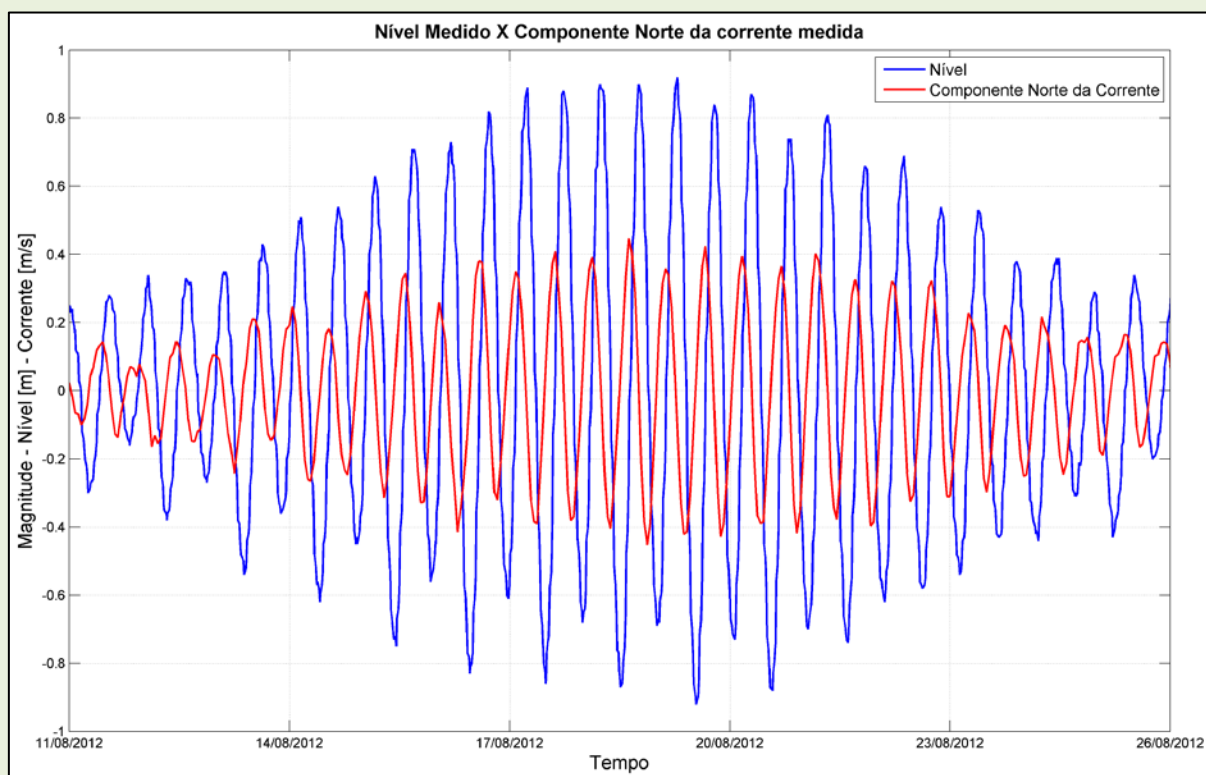


Figura 7: Dados medidos em campo de nível do mar e componente norte da corrente. Exemplo da variação da corrente com período mareal, demonstrando que a corrente presente na região está associada principalmente à corrente de maré.

2.2 VENTOS

Para caracterização do regime de ventos foi utilizada uma série de dados proveniente do modelo global WavewatchIII – WWIII (TOLMAN, 1997; 1999), um modelo espectral de terceira geração que simula processos de geração/propagação de ondas em águas profundas, com base em dados meteorológicos de reanálise. Possui resolução espacial de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ e resolução tempo a cada 3 horas. Foi analisada uma série extraída nas coordenadas geográficas $37^\circ 30' S$, $19^\circ O$, mesmo ponto em que foram extraídos os dados de ondas (Figura 9), para um período de 30 anos de dados (Janeiro de 1979 a Dezembro de 2009), representativos da região Leste do estado do Espírito Santo. Na Figura 8 é apresentada a rosa dos ventos e o diagrama direcional, gerados a partir desses dados. O Quadro 1 apresenta o diagrama de ocorrência conjunta dos dados de vento, onde os casos com maior frequência de ocorrência aparecem realçados.

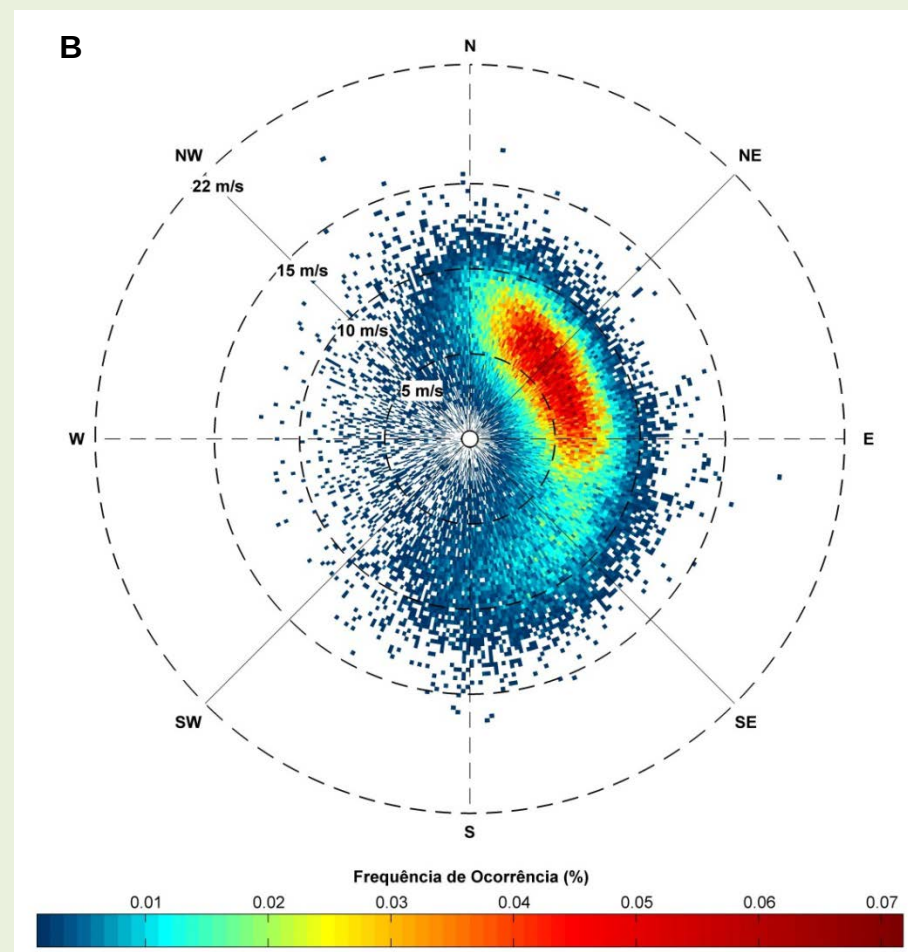
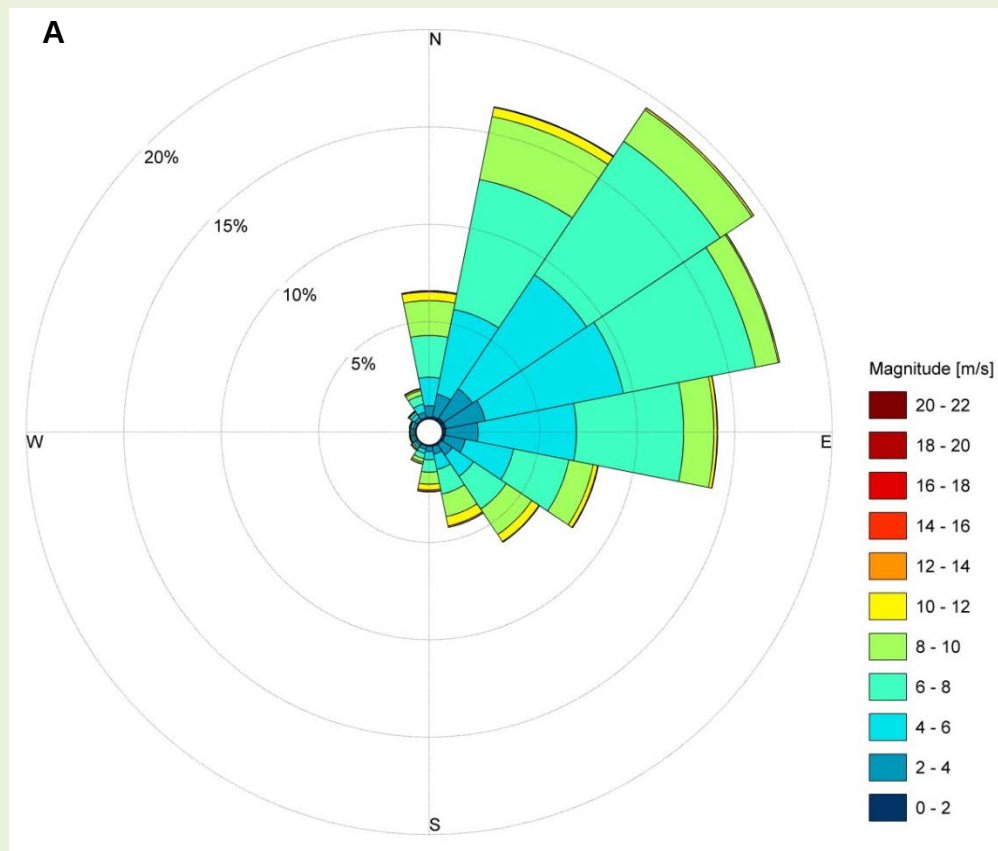


Figura 8 (A) Rosa de ventos gerada a partir dos dados do modelo WW3 na coordenada 37°30' S, 19° O, para o período entre 1979 e 2009. (B) Diagrama Direcional de frequência relativa dos ventos do modelo WW3 para o mesmo ponto e período de tempo.

Quadro 1: Diagrama de distribuição conjunta de intensidade e direção dos ventos (janeiro de 1979 a dezembro de 2009) – convenção meteorológica.

Vel \ Dir	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Num. Casos	Frequência (%)
0 - 2	98	127	178	189	160	136	92	89	64	53	48	50	42	42	55	79	1502	1.66
2 - 4	528	1068	1651	1876	1520	975	602	358	237	158	112	114	101	111	166	258	9835	10.86
4 - 6	1325	4046	6401	6574	4593	2290	1186	728	390	198	110	94	91	118	183	389	28716	31.70
6 - 8	1942	6152	7445	6223	4955	2618	1836	1170	575	251	85	51	62	47	108	411	33931	37.46
8 - 10	1617	2962	1743	1061	1391	1144	1415	1063	561	165	58	24	17	25	45	219	13510	14.91
10 - 12	401	430	100	66	150	211	398	441	269	80	16	6	7	7	17	75	2674	2.95
12 - 14	50	31	9	7	19	31	30	65	68	17	1	1	1		3	28	361	0.40
14 - 16	5	5	1	1	3	3	1	5	17	1					1	5	48	0.05
16 - 18	1								3								4	0.00
18 - 20					1											1	2	0.00
20 - 22		1															1	0.00
Num. Casos	5967	14822	17528	15997	12792	7408	5560	3919	2184	923	430	340	321	350	578	1465		
Frequência	6.59	16.36	19.35	17.66	14.12	8.18	6.14	4.33	2.41	1.02	0.47	0.38	0.35	0.39	0.64	1.62		
Vel Med	6.95	6.61	6.03	5.75	5.98	6.17	6.83	7.20	7.28	6.35	5.21	4.42	4.57	4.59	4.93	6.06		
Vel Max	16.91	20.07	14.38	14.09	18.26	15.60	14.21	15.08	16.41	14.13	13.07	12.31	12.12	11.94	14.71	18.49		

[Assinatura]

[Assinatura]

2.3 ONDAS EM ÁGUAS PROFUNDAS

Pianca *et al.*/2010 a partir de uma base de dados referente à janeiro de 1997 a fevereiro de 2007 caracterizaram as ondas do litoral brasileiro. Os autores descrevem a região do presente estudo em função da porcentagem de ocorrência das direções. Segundo os autores, durante todo o ano as ondas de Sul e de Leste são as mais frequentes na região. Os dados apresentados pelos autores estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2: Resumo da caracterização de ondas feita por Pianca (2010) para a região do presente estudo.

Estação		Dir	H _s	T _p
Verão	E	41,3%	1-2	6-8
	S	27,4%	1-2	10-12
Outono	E	27,3%	1-2	6-8
	S	47,3%	1-3	10-12
Inverno	E	40,5%	1-3	6-10
	S	30,9%	2-3	10-12
Primavera	E	34,1%	1-2	6-8
	S	34,2%	1-2	8-12

Além dos dados descritos na literatura, foram analisados 30 anos de dados de onda (série temporal entre janeiro de 1979 a dezembro de 2009) em um ponto localizado em águas profundas (Figura 9) com o intuito de caracterizar o clima de ondas em águas profundas na região central do Estado do Espírito Santo.

Esses dados são provenientes do modelo global WavewatchIII – WWIII (TOLMAN, 1997; 1999), um modelo espectral de terceira geração que simula processos de geração/propagação de ondas em águas profundas, com base em dados meteorológicos de reanálise. Possui resolução espacial de 0,5° x 0,5° e resolução tempo a cada 3 horas.

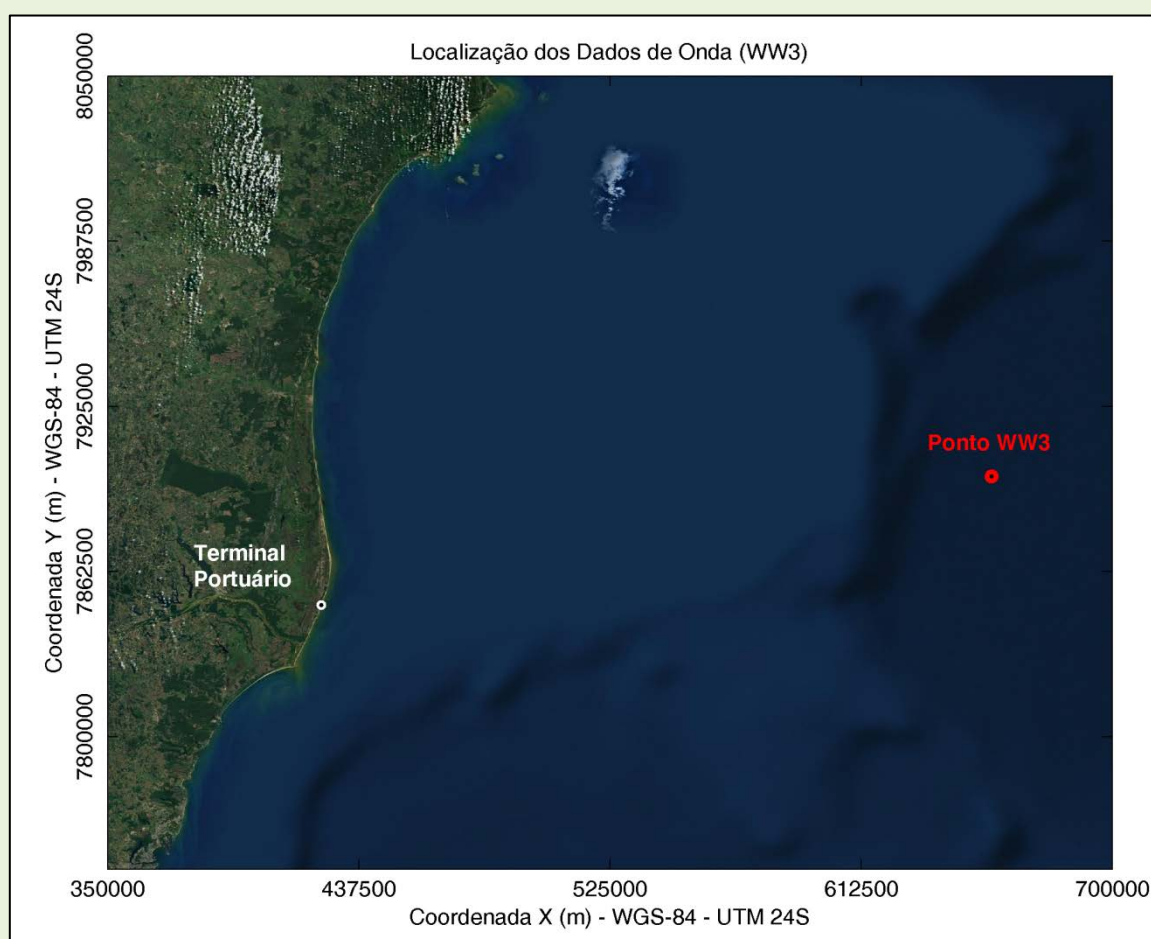


Figura 9: Localização dos dados de onda utilizados para caracterização.

A série temporal apresenta valores de altura significativa (H_s), período de pico (T_p) e direção de pico (D_p) a cada três horas.

Ao analisar os dados extraídos diretamente do Wavewatch III (dados paramétricos), notou-se que ondulações muito importantes do quadrante nordeste (ondulações *sea*, geradas por vento) eram mascaradas quando ocorriam em conjunto com ondulações maiores dos quadrantes leste e sul. Isto ocorre pelo fato de que o dado paramétrico assume a direção de pico, ou seja, a direção do estado de mar com maior altura de onda. Para dar maior importância para casos de ondas de nordeste, foi realizada uma análise espectral do resultado do modelo Wavewatch III e utilizados os três maiores estados de mares presentes. Para maiores informações, consultar Hanson e Jensen (2005).

A Figura 10 apresenta a rosa direcional de altura significativa de ondas (H_s) gerada a partir da série temporal de dados em águas profundas. As distribuições conjuntas de altura significativa x direção, período de pico x direção e altura significativa x período de pico estão apresentados nos quadros 2, 3 e 4 respectivamente. A altura significativa de ondas excedida somente 12 horas por ano (H_{s12}) foi de 4,7 metros, associada a um período (T_{p12}) de 17 segundos.

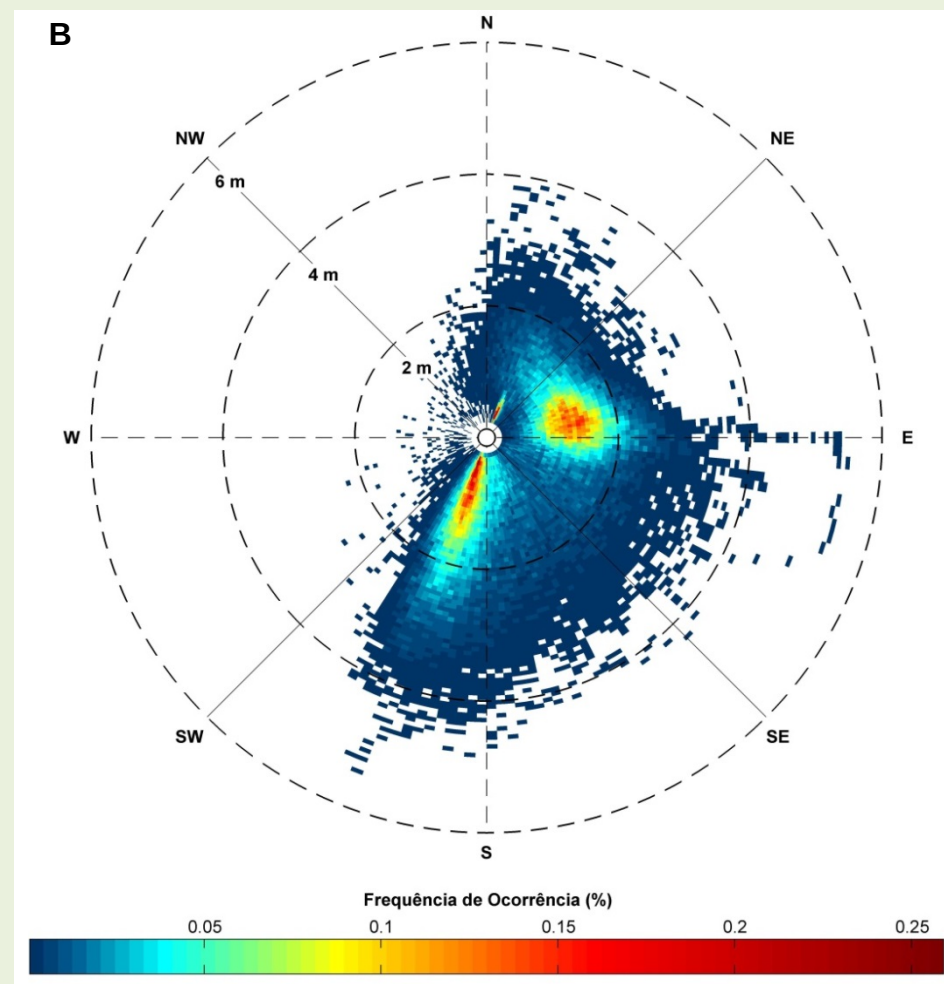
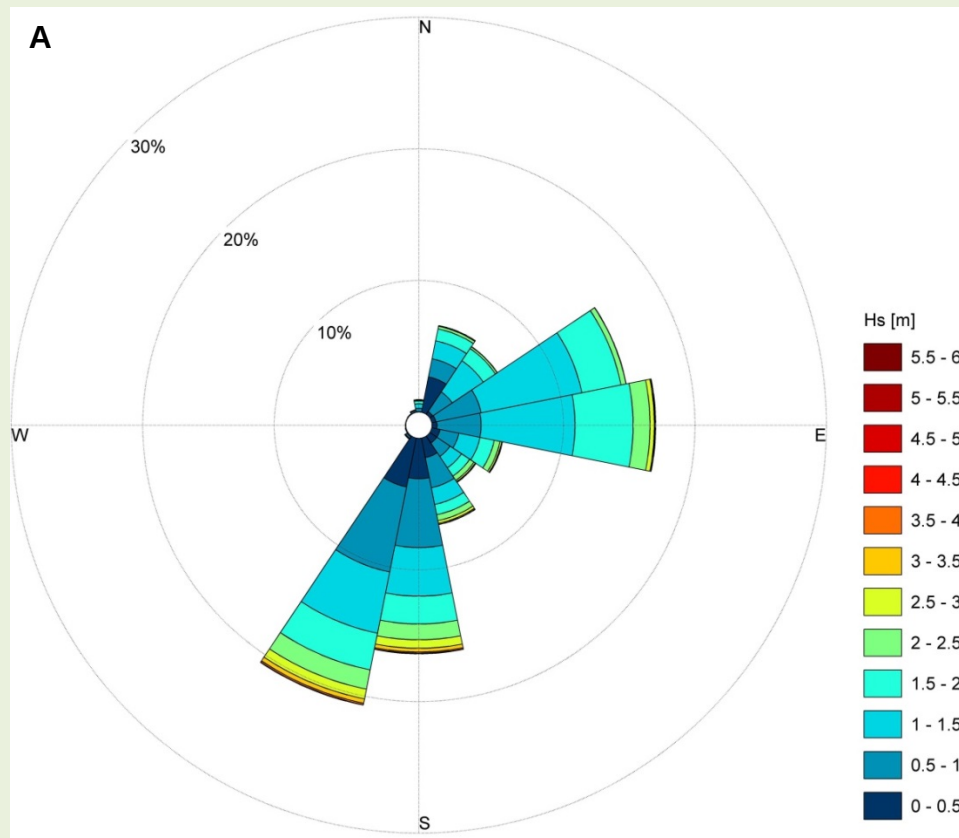
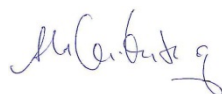


Figura 10 (A) Rosa de altura significativa de ondas em águas profundas (H_s) gerada a partir dos dados do modelo WW3 na coordenada $37^{\circ}30' S$, $19^{\circ} O$, para o período entre 1979 e 2009. (B) Diagrama Direcional de frequência relativa das alturas significativas de ondas do modelo WW3 para o mesmo ponto e período.

O Quadro 2 apresenta o diagrama de ocorrência conjunta de altura significativa (metros) e direção de ondas (graus). Nota-se que as ondas de maior frequência de ocorrência estão entre 1,5 e 2m (40%) sendo as direções mais frequentes entre Sul e Sudoeste (40,69%) e Leste (17,88%). A maior altura significativa (5-5,5 m) está relacionada ao quadrante Sul, corroborando com Pianca *et al*/(2010).

Quadro 2: Diagrama de ocorrência conjunta de altura significativa (H_s), em metros, e direção de ondas (Dir), em graus, gerado a partir dos dados do modelo WWIII.

H_s - Dir	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Frequência	H_s Med	H_s Max
0 - 0.5																			
0.5 - 1		10	3	8	27	7	11	19	24	11							0.6 %	0.94	1.00
1 - 1.5	12	106	150	413	995	549	501	514	607	583	5	2	1		3	3	22 %	1.31	1.50
1.5 - 2	53	350	235	598	1462	809	824	777	1427	1519	1					5	40 %	1.74	2.00
2 - 2.5	31	88	51	167	750	377	337	470	985	1082							21 %	2.21	2.50
2.5 - 3	7	28	8	17	285	152	130	220	459	668	1						10 %	2.71	3.00
3 - 3.5	6	10		3	75	69	66	104	203	316	1						4.2 %	3.18	3.50
3.5 - 4	4				16		19	25	84	127	1						1.4 %	3.72	4.00
4 - 4.5					2			4	48	53							0.53 %	4.16	4.49
4.5 - 5								3	11	11							0.12 %	4.69	4.98
5 - 5.5										1							0.005 %	5.01	5.01
Frequência	0.56%	2.93%	2.21%	5.97%	17.88%	9.72%	9.35%	10.57%	19.05%	21.64%	0.045%	0.01%	0.005%		0.015%	0.040%			
H_s Med	2.03	1.78	1.66	1.66	1.82	1.83	1.83	1.93	2.06	2.16	2.02	1.44	1.44		1.40	1.56			
H_s Max	3.68	3.33	2.94	3.19	4.06	3.49	3.93	4.76	4.80	5.01	3.63	1.45	1.44		1.45	1.75			

No Quadro 3 é apresentado o diagrama de ocorrência conjunta de período de pico (T_p), em segundos, e direção (Dir), em graus, das ondas. Nota-se que os períodos de maior frequência variam entre 6-8 s (21%) e 8-10 s (31,1%), relacionados principalmente com ondas dos quadrantes Leste (gerada mais próxima à área de estudo) períodos entre 10-12 s (24,4%), provenientes principalmente de Sul (tendo sua ocorrência relacionada à entrada de frentes frias – geração mais afastada da área) respectivamente, tal qual descrito por Pianca *et al.* 2010.

Quadro 3: Diagrama de ocorrência conjunta de período de pico (T_p), em segundos, e direção de ondas (Dir), em graus, gerado a partir dos dados do modelo WWIII.

T_p - Dir	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Freq.	T_p Min	T_p Med	T_p Max
0 - 2																				
2 - 4		1	2														0.015%	3.23	3.69	3.95
4 - 6	81	417	203	92	40	12	8	7	8	2	2	2	1		3	8	4.39%	4.09	5.45	6.00
6 - 8	30	158	237	843	1854	623	273	105	82	49	3						21.08%	6.01	7.11	8.00
8 - 10		8	4	270	1581	1237	1144	853	881	302	1						31.10%	8.01	8.87	10.00
10 - 12		1	1	1	137	90	318	754	1782	1844							24.40%	10.01	10.99	12.00
12 - 14	2	1					110	355	840	1606	3						14.44%	12.01	12.75	14.00
14 - 16		6				1	34	59	234	465							3.96%	14.01	14.64	16.00
16 - 18							1	3	21	85							0.54%	16.01	16.70	18.00
18 - 20										13							0.064%	18.85	19.25	19.65
20 - 22										5							0.025%	20.13	20.88	21.44
Freq.	0.56%	2.93%	2.21%	5.97%	17.88%	9.72%	9.35%	10.57%	19.05%	21.64%	0.045%	0.01%	0.005%		0.015%	0.04%				
T_p Med	5.93	5.85	5.99	7.20	7.90	8.34	9.30	10.38	11.14	12.11	8.80	5.30	5.31		4.63	4.76				
T_p Max	14.00	14.20	10.01	10.57	10.77	15.59	16.35	16.37	17.87	21.44	13.64	5.32	5.31		5.10	5.16				

No Quadro 4 estão apresentados os dados de alturas significativas (metros) e período de pico (segundos) para a série analisada. Nota-se que as alturas significativas mais frequentes variam entre 1 a 2,5 m e os períodos entre 6 a 12 s. Esta faixa está relacionada principalmente às ondas provenientes dos quadrantes Leste e Sul.

Quadro 4: Diagrama de ocorrência conjunta de altura significativa (H_s), em metros, e período de pico (T_p), em segundos, gerado a partir dos dados do modelo WWIII.

$H_s - T_p$	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20	20 - 22	Freq.	T_p Min	T_p Med	T_p Max
0 - 0.5															
0.5 - 1		2	6	45	43	5	11	8				0.60%	3.23	6.99	15.80
1 - 1.5		1	351	1598	1358	679	310	113	27	5	2	22.15%	3.95	7.85	21.22
1.5 - 2			472	1895	2622	1992	803	231	38	5	2	40.17%	4.47	8.48	21.44
2 - 2.5			57	493	1515	1272	786	186	26	2	1	21.62%	5.29	9.11	20.13
2.5 - 3				158	532	615	548	113	8	1		9.84%	6.15	9.53	18.93
3 - 3.5				62	169	273	269	76	4			4.25%	6.87	10.16	16.96
3.5 - 4				6	39	60	122	47	2			1.38%	7.43	11.34	17.36
4 - 4.5					3	32	50	19	3			0.53%	9.01	12.35	17.38
4.5 - 5							18	5	2			0.12%	12.24	13.51	16.96
5 - 5.5								1				0.005%	14.57	14.57	14.57
Freq.		0.015%	4.42%	21.21%	31.29%	24.40%	14.20%	3.86%	0.52%	0.065%	0.025%				
H_s Med		0.91	1.40	1.42	1.57	1.86	2.21	2.18	2.02	1.75	1.54				
H_s Max		1.07	2.42	3.68	4.45	4.49	4.82	5.01	4.59	2.51	2.04				




3 Modelos Numéricos

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).

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) ou 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 quantidade de movimento é reduzida à relação da pressão hidrostática e as acelerações verticais são assumidas como sendo muito pequenas em relação à aceleração da gravidade. Isso faz com que o Delft3D-FLOW seja adequado para a previsão 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 DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS *SWAN*

O SWAN foi desenvolvido na Delft University of Technology (Holanda) e é especificado como o novo padrão em estudos de modelagem de ondas e proteção costeira. Por este motivo, a Deltares® (antiga WL | Delft Hydraulics) integrou o modelo SWAN no pacote de modelos Delft3D. Detalhes sobre formulações e uma série de referências e publicações realizadas pela comunidade científica sobre o modelo SWAN podem ser encontradas na página web: <http://www.swan.tudelft.nl/>

O modelo SWAN é baseado na equação de conservação da ação de onda e é espectral (em todas as direções e frequências). Isso significa que um campo de ondas de cristas curtas, randômico, propagando-se simultaneamente a partir de diferentes direções, pode ser bem representado (e.g. um swell (marulho) sobreposto por um mar de vento local). O SWAN computa a evolução de um campo de ondas de cristas curtas randômico, em águas profundas, intermediárias e rasas, assim como em ambientes com presença de correntes (e.g. desembocaduras). O modelo calcula os processos de refração provocados por correntes ou por mudanças na profundidade e representa os processos de geração de ondas pelo vento, dissipação por *whitecapping* (“carneirinhos”), fricção com o fundo e quebra induzida pela profundidade, assim como interações não-lineares onda-onda (frequency shift, quadruplets e triads), explicitamente, com as formulações que representam o “estado-da-arte” em modelagem de ondas. Interferências das correntes nas ondas são também representadas explicitamente no modelo. Muito importante em estudos de engenharia costeira e portuária são os processos de difração, transmissão, bloqueio e reflexão em obstáculos, também incluídos nas formulações do modelo. O SWAN tem sido validado e verificado com sucesso em uma gama de experimentos complexos de campo e laboratório (RIS *et al.*, 1999; WL I DELFT HYDRAULICS, 1999, 2000).

3.3 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 dinâmico (Figura 11).

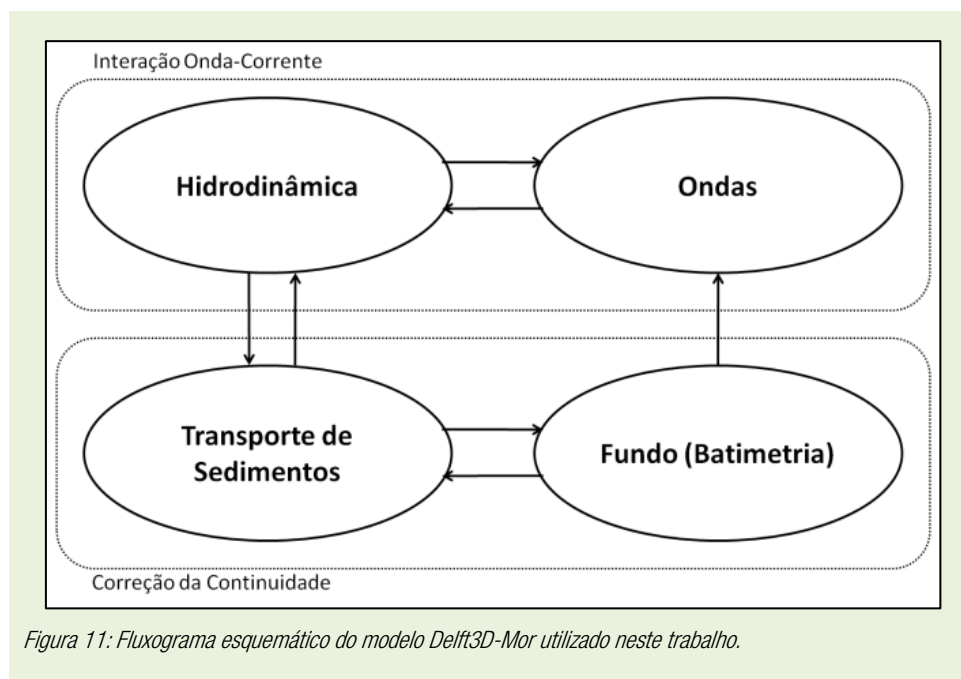


Figura 11: Fluxograma esquemático do modelo Delft3D-Mor utilizado neste trabalho.

3.3.1 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 do sedimento 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.

A formulação da velocidade de sedimentação para areia e lama difere 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).

3.4 GRADES NUMÉRICAS

As grades numéricas utilizadas nos modelos são apresentadas na Figura 12 e Figura 13.

A Figura 12 apresenta as grades utilizadas para o modelo de ondas, composta por uma grade regional (em branco na figura) que abrange desde regiões de águas profundas e todo o banco de Abrolhos, com resolução espacial de 2,5 km e 152 x 102 elementos. A grade intermediária (em vermelho) tem resolução espacial de 1 km e 102 x 152 elementos de grade. A grade local (em amarelo) com maior resolução espacial foi criada para resolver os processos inerentes à zona de surfe e face da praia, como interação das ondas com o fundo, quebra de ondas na face da praia, processos de refração e difração, entre outros. A grade local de ondas possui 390 x 171 elementos de cálculo.

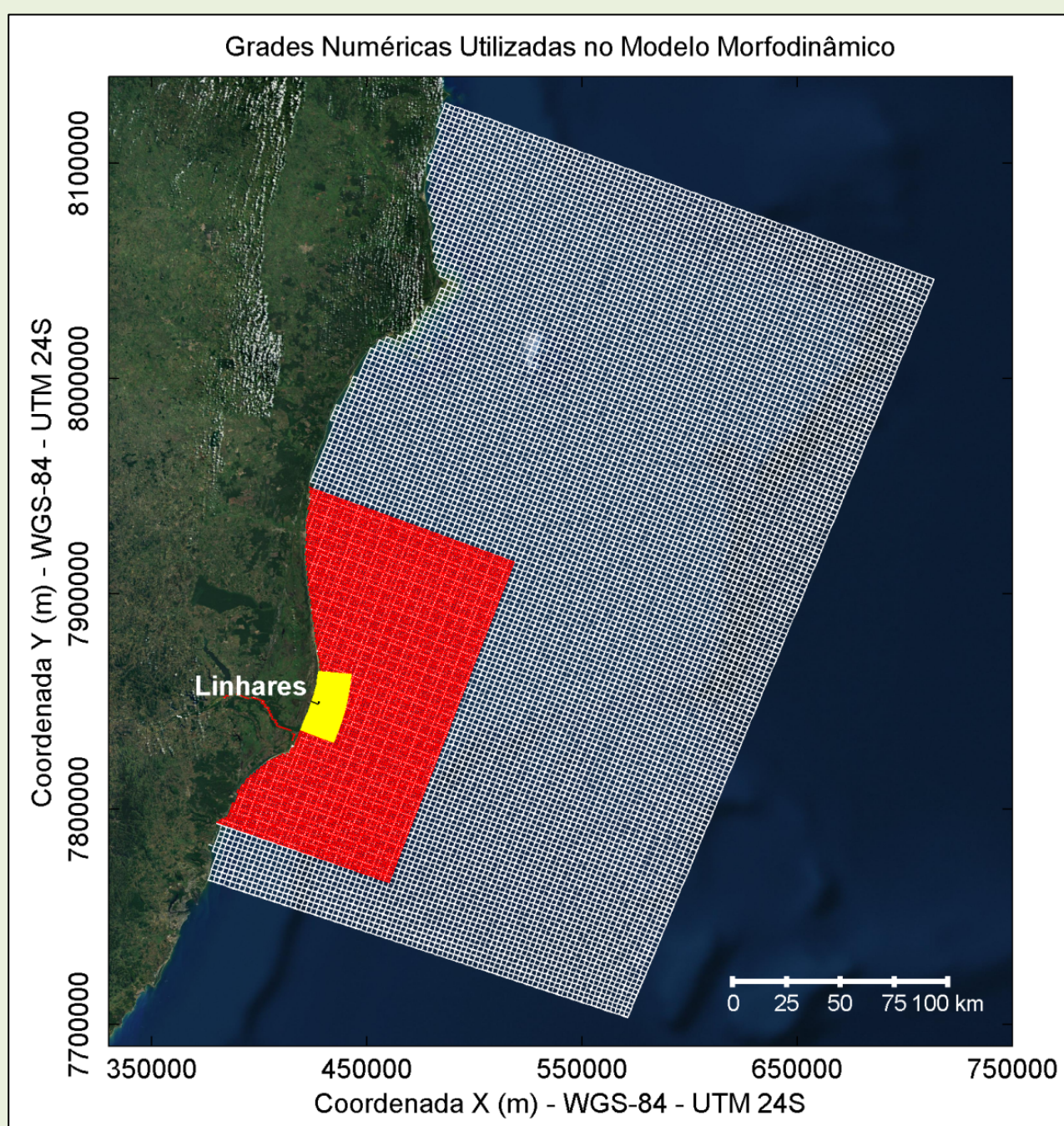


Figura 12: Grade numérica utilizada no modelo morfológico. Em preto a localização do futuro terminal portuário.

Na Figura 13 é apresentada a grade numérica para os modelos hidrodinâmicos e morfológicos, com resolução espacial variando de 14 metros na zona de surf até 380 metros nas regiões mais distantes, e 390 x 171 elementos de cálculo.



3.5 BATIMETRIA

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

Na Figura 14 são apresentadas as cartas náuticas utilizadas para digitalização dos valores de profundidade. A descrição das cartas náuticas utilizadas é apresentada na Tabela 3.

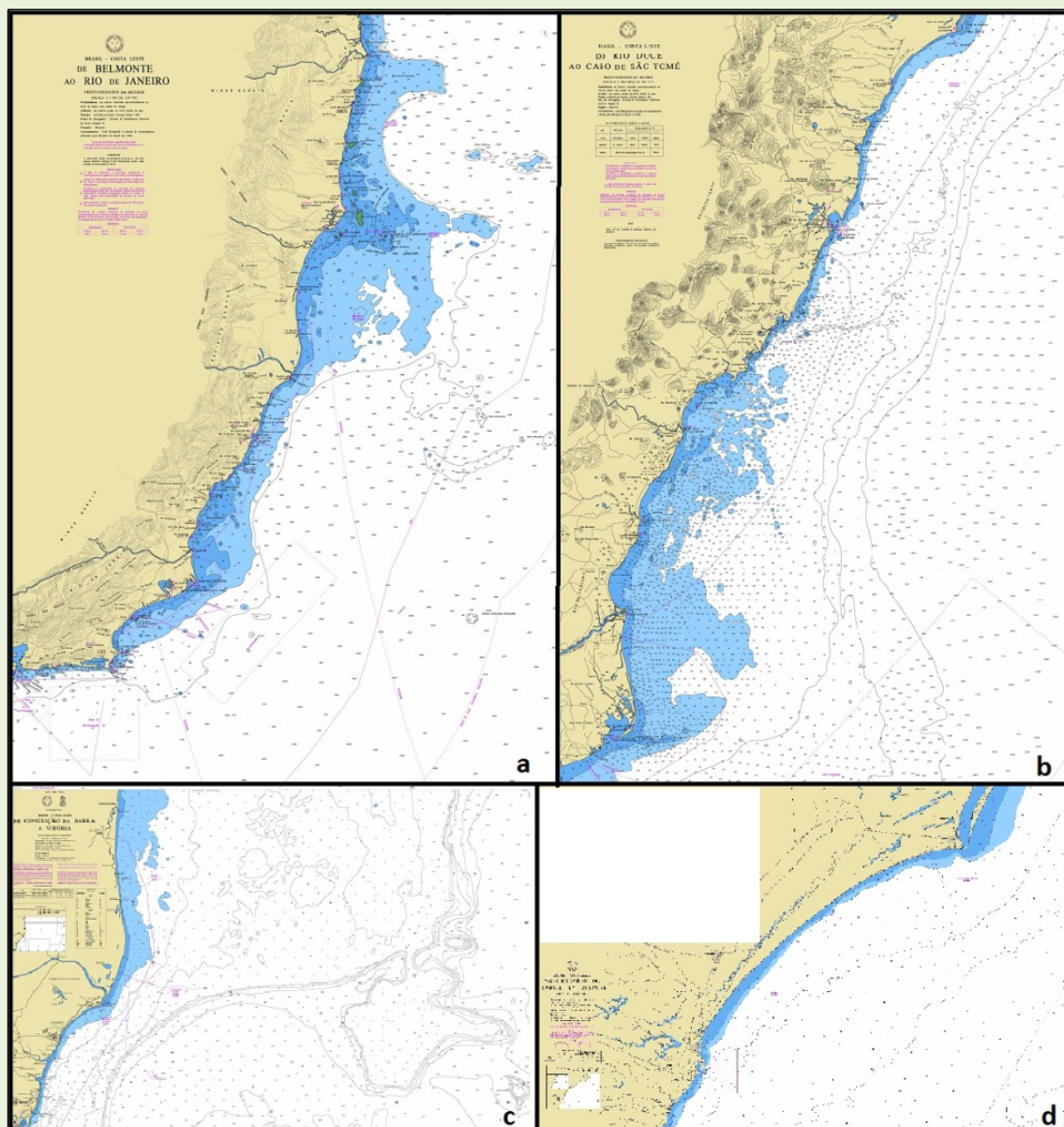


Figura 14 Cartas náuticas utilizadas para digitalização dos valores de profundidade. Cartas (a) 70, (b) 1400, (c) 22800, (d) 1420.

Tabela 3: Cartas náuticas utilizadas e suas escalas.

Carta Náutica	Número	Escala
De Belmonte 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 do levantamento efetuado nas proximidades do futuro terminal portuário são apresentados na Figura 15.

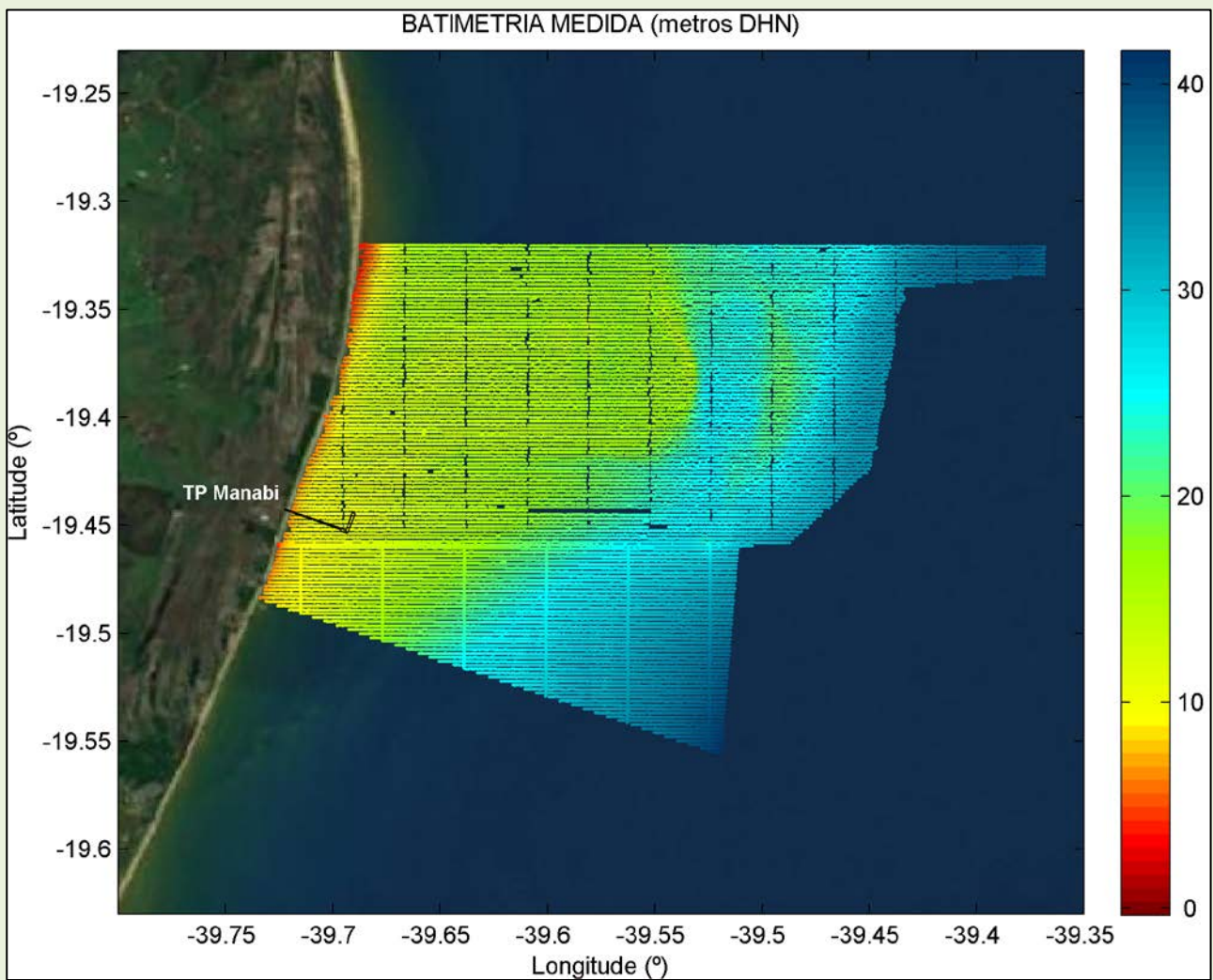


Figura 15: Pontos de batimetria obtidos pelo levantamento batimétrico efetuado nas proximidades do futuro terminal portuário – Linhares - ES. Batimetria cedida pela empresa Econservation (dados referenciados verticalmente ao nível médio do mar –N.M.).

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 16 a Figura 18.

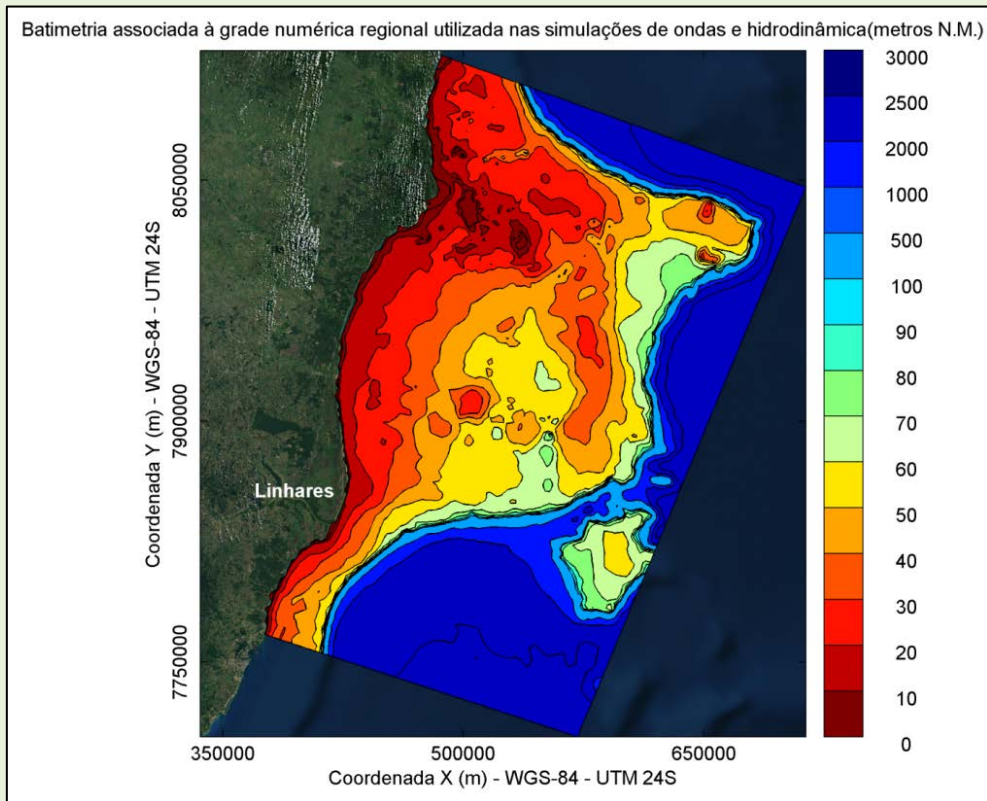
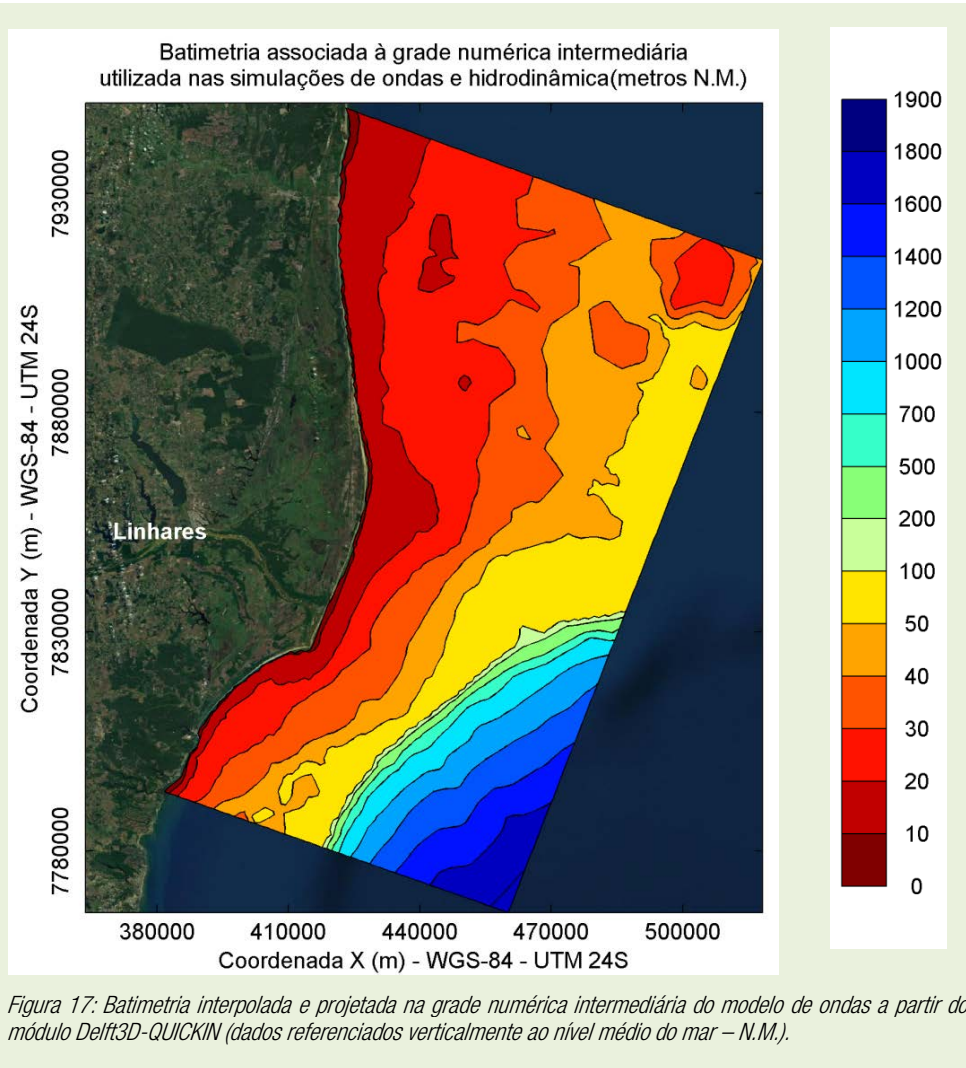


Figura 16: Batimetria interpolada e projetada na grade numérica regional do modelo de ondas a partir do módulo Delft3D-QUICKIN (dados referenciados verticalmente ao nível médio do mar – N.M.).



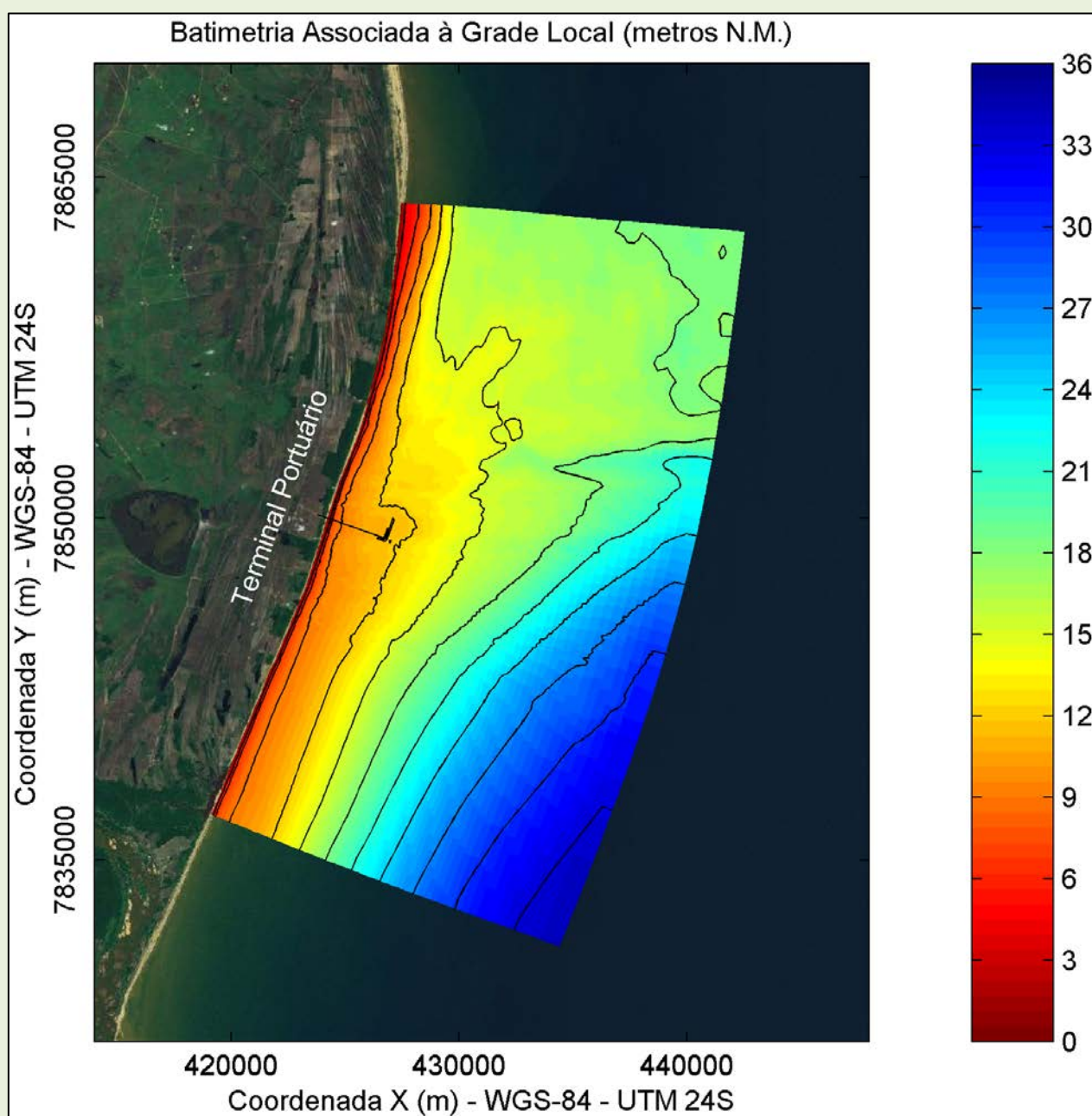


Figura 18: Batimetria utilizada no modelo morfológico. Profundidades em metros abaixo do nível médio do mar.

De acordo com informações de projeto, o terminal portuário Manabi apresentará canal de navegação com 9,3 km de comprimento e profundidade de 22,5 metros (DHN), bacia de evolução com 628 metros de diâmetro com profundidade de 21 metros (DHN) e berço com profundidade igual a 20 metros (DHN). O terminal terá uma ponte de acesso de 2500 metros de comprimento e quebra-mar em formato L, com 1000 metros de extensão no eixo maior e 320 metros no eixo menor. Na Figura 19 é apresentada a batimetria do cenário com a alternativa.

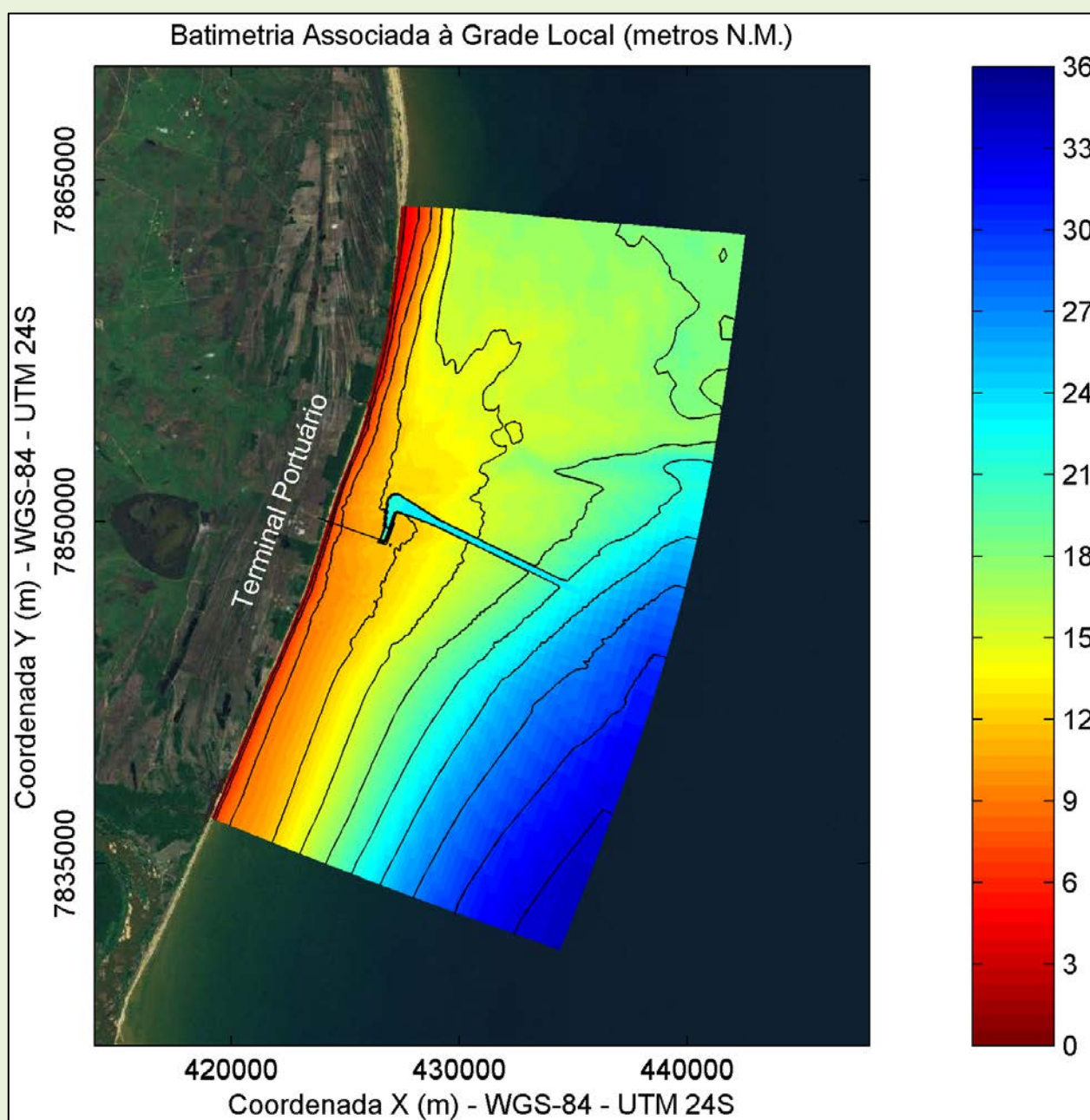


Figura 19: Batimetria utilizada no modelo morfológico no cenário com alternativa. Profundidades em metros acima do nível médio do mar.

3.6 DEFINIÇÃO DOS CASOS PROPAGADOS NO MODELO DE ONDAS

A definição dos casos de ondas utilizados nas simulações morfodinâmicas de avaliação dos possíveis impactos da construção do terminal portuário da Manabi Mineração levou em consideração o clima de ondas em águas profundas e em águas rasas. Os dados do clima de ondas em águas profundas, oriundos do modelo WW3 foram apresentados anteriormente. Para conhecer o clima de ondas nas proximidades da área de estudo e selecionar os estados de mar representativos, foi necessário aplicar técnicas de transferência da série de ondas de águas profundas para águas rasas (hipercubo), conforme descrito seguir.

3.6.1 Ondas em Águas Rasas – Método do Hipercubo

Na grande maioria das regiões ao redor do mundo, principalmente nos países em vias de desenvolvimento, as séries temporais de dados medidos em águas rasas não são suficientemente longas para caracterizar o clima marítimo e obter os parâmetros de ondas necessários para o dimensionamento das estruturas costeiras e de proteção a costa (BONANATA et. al, 2010).

O método de transferência da série original de águas profundas para águas rasas, conhecido como método do hipercubo, é uma técnica amplamente testada e validada, desenvolvida pelo Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade de Cantábria (IH-Cantabria). O hipercubo funciona basicamente como uma técnica de interpolação linear em 3 dimensões que, aplicada aos parâmetros de onda e coeficientes de propagação com características direcionais, possibilita reconstruir a série temporal em águas rasas com o mesmo comprimento da série temporal original de águas profundas. Na Figura 20 é ilustrado o funcionamento da técnica de interpolação do hipercubo. Com os resultados da propagação de um determinado número de estados de mar com diferentes combinações de H_s , T_p e Dir , desde águas profundas até um ponto de interesse nas proximidades da costa, é possível realizar a interpolação linear tridimensional dos resultados para se determinar os valores de H_{si} , T_{pi} e Dir_i nesse ponto para cada estado de mar da série original em águas profundas.

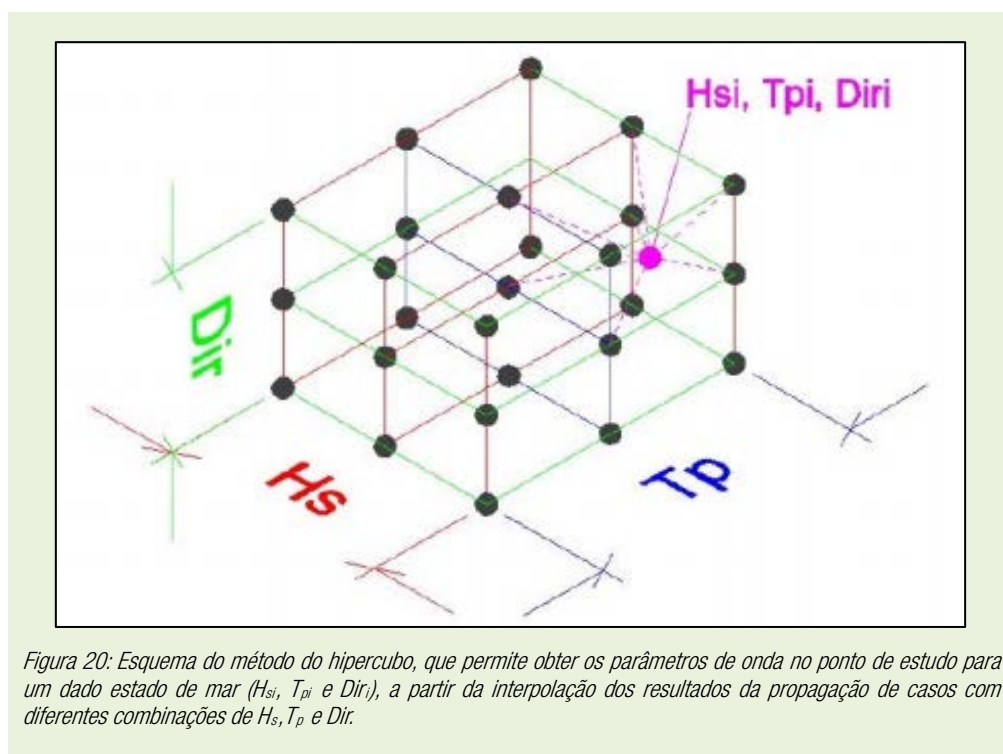


Figura 20: Esquema do método do hipercubo, que permite obter os parâmetros de onda no ponto de estudo para um dado estado de mar (H_{si} , T_{pi} e Dir_i), a partir da interpolação dos resultados da propagação de casos com diferentes combinações de H_s , T_p e Dir .

Os estados de mar propagados para realizar o hipercubo foram definidos a partir da série temporal de dados de onda em águas profundas. Esses dados foram processados em ambiente Matlab® e, ao final, foram selecionados 908 casos de ondas para propagação (combinações de H_s , T_p e Dir em águas profundas, discretizadas em classes com resolução de 0,5 m, 2 s e 22,5°, respectivamente - Figura 21, Figura 22 e Figura 23).

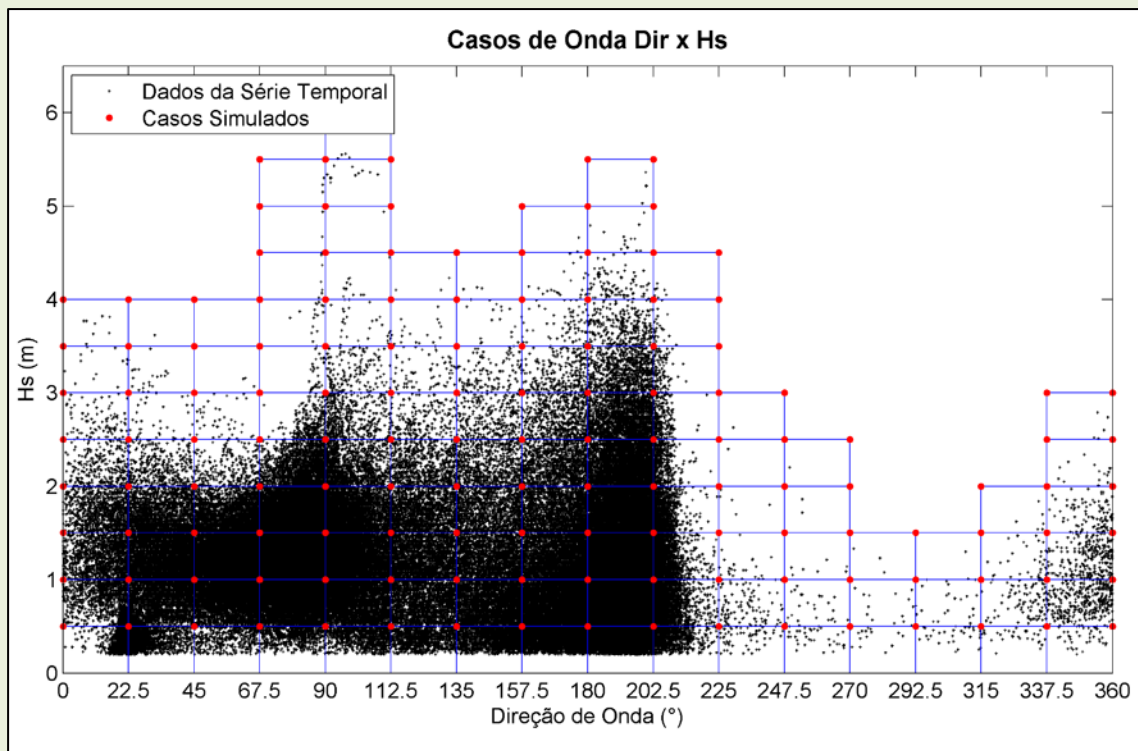


Figura 21: Casos de ondas (Dir x Hs) selecionados para as propagações de ondas (pontos vermelhos).

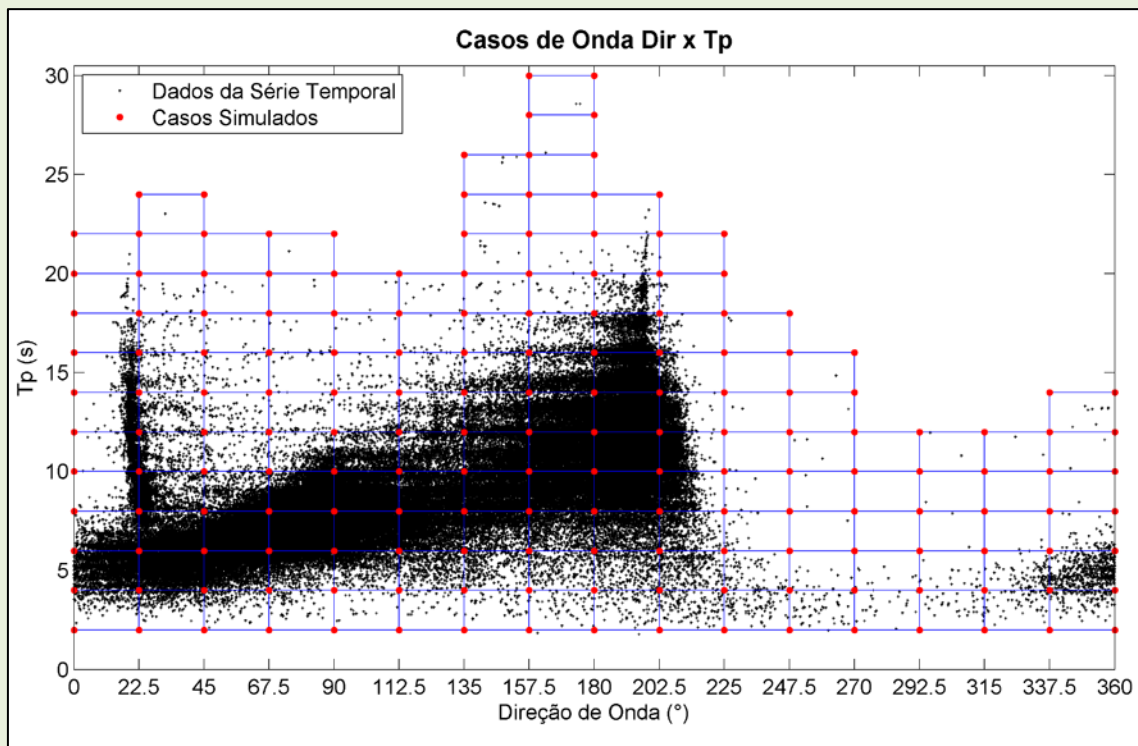


Figura 22: Casos de ondas (Dir x T_p) selecionados para as propagações das ondas (pontos vermelhos).

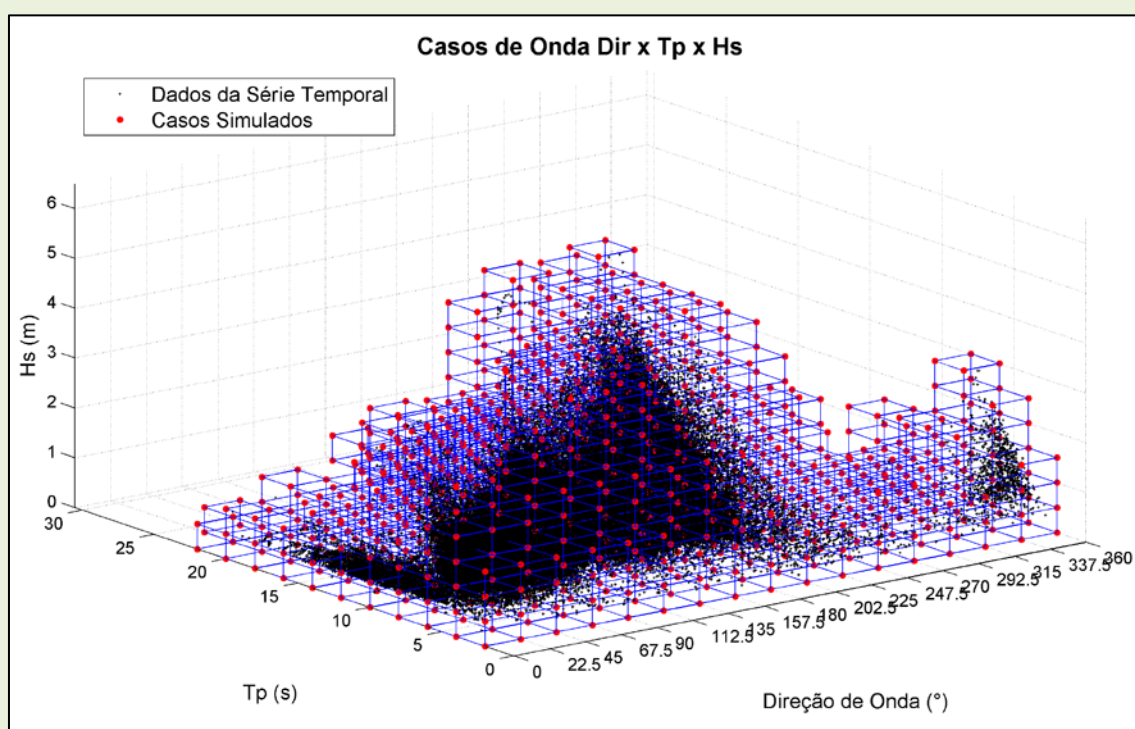


Figura 23: Casos de ondas (Dir x Tp x Hs) selecionados para as propagações de ondas (pontos vermelhos).

Os resultados de H_s , T_p e Dir obtidos a partir da propagação dos 908 casos foram extraídos para o ponto apresentado na Figura 24, situado em frente à área de estudo, em aproximadamente 20 metros de profundidade.

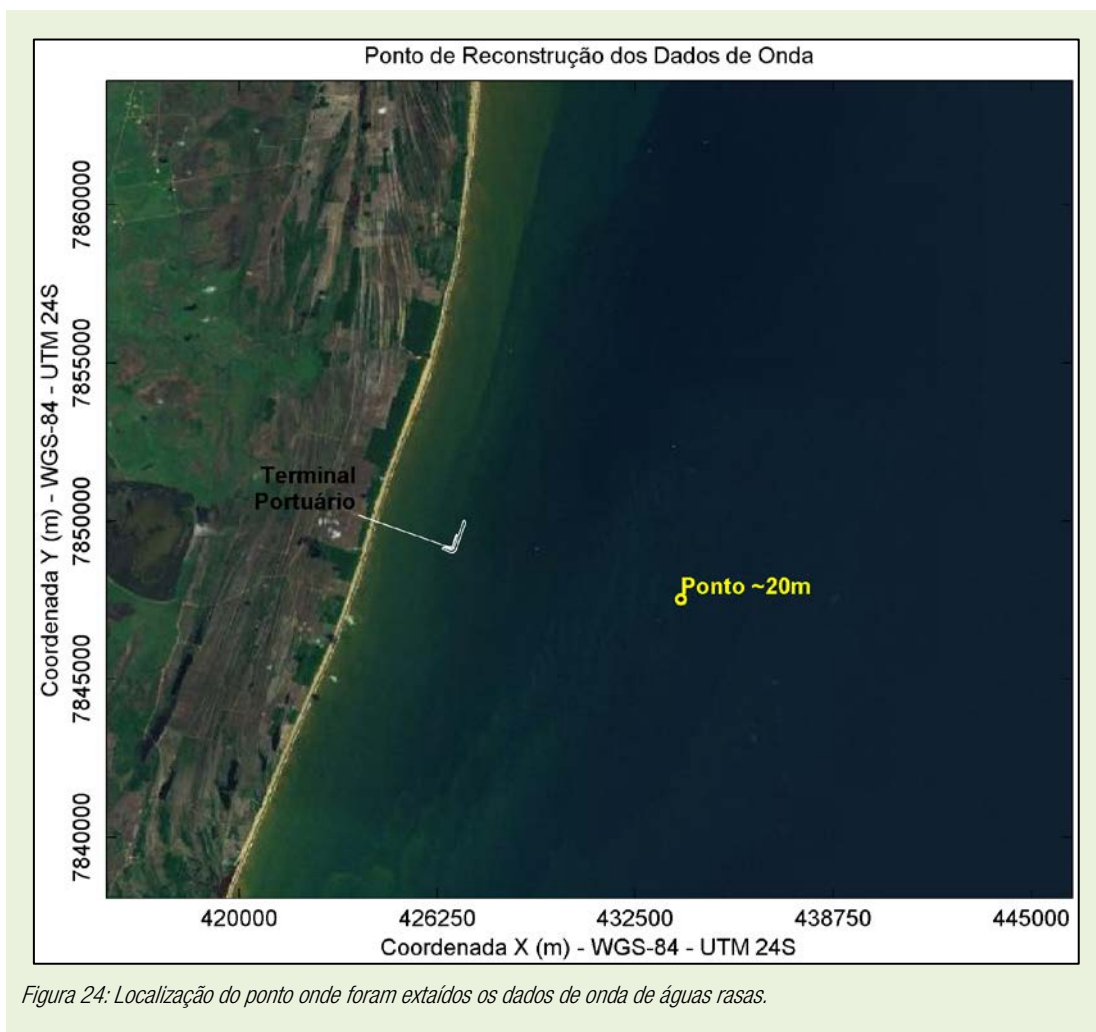


Figura 24: Localização do ponto onde foram extraídos os dados de onda de águas rasas.

Aplicando o método do hipercubo através de programas elaborados em ambiente Matlab® e utilizando estes resultados, foi possível reconstruir a série temporal em águas rasas. A rosa de ondas em águas rasas geradas a partir da série reconstruída está apresentada na Figura 25.

A partir da análise da rosa direcional de ondas nota-se a redução da altura de onda em mais de um metro, bem como redução da gama de ondulações presentes na região em comparação com a rosa de águas profundas (Figura 25). Isso ocorre pelos processos de dissipação de energia à medida que as ondas se propagam sobre a plataforma e pela refração (que tende a direcionar as cristas de onda paralelamente à costa), respectivamente.

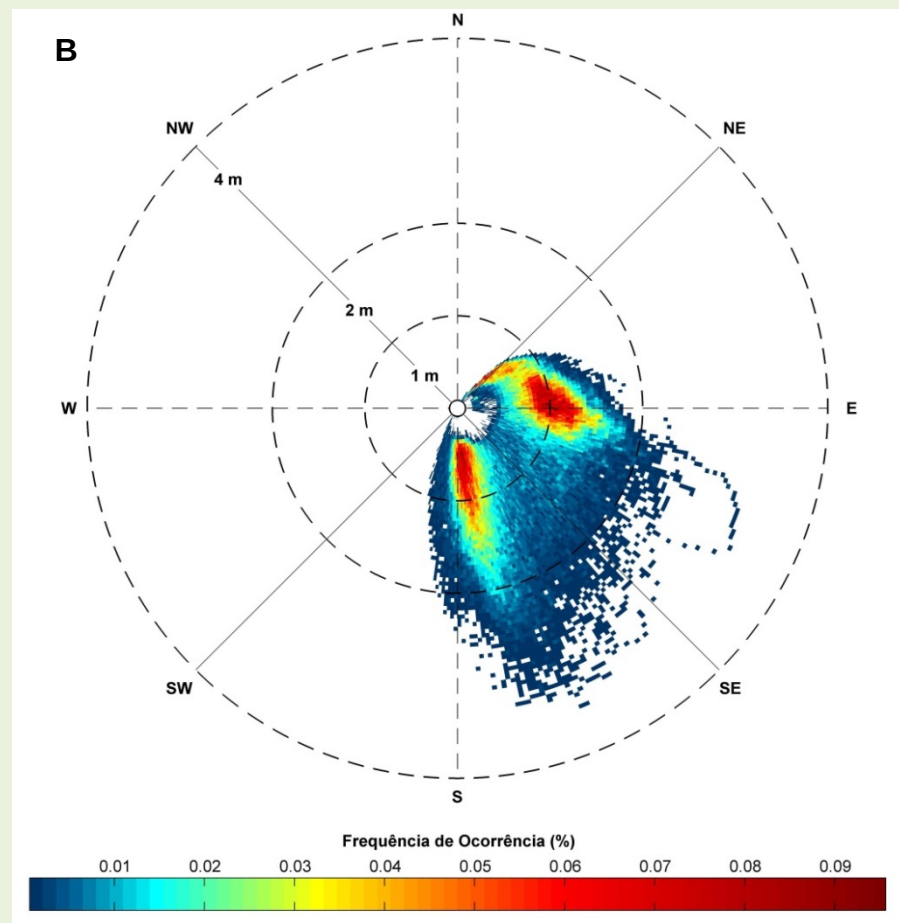
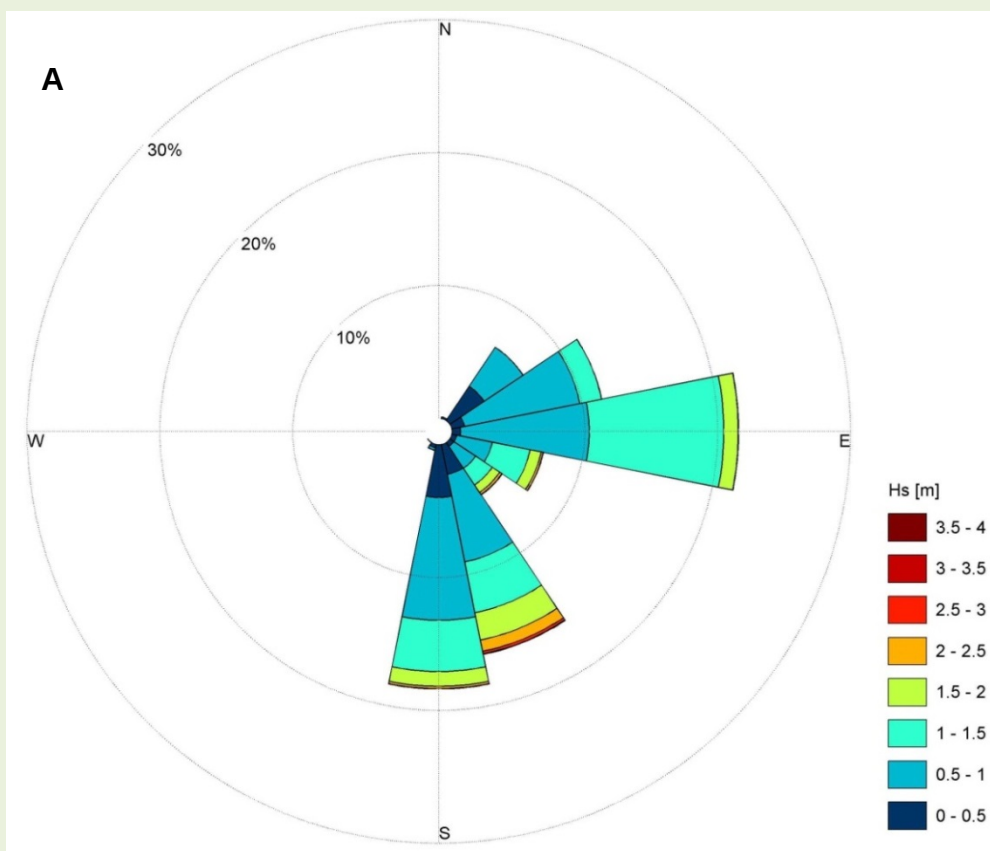
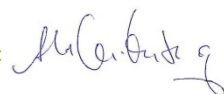


Figura 25: (A) Rosa direcional de H_s em 20 metros de profundidades. (B) Diagrama direcional de H_s em 20 m de profundidade, em frente à área de estudo.

O Quadro 5 mostra a distribuição de ocorrência conjunta de altura significativa (H_s), em metros, e direção (Dir), em graus, das ondas próximas à área de estudo. As ondas do quadrante Sul e Sul-Sudeste são as mais frequentes (18,37% e 16,10 % respectivamente), seguidas das ondulações de Leste e Leste-Nordeste com 21,57 e 11,49% respectivamente. A altura significativa (H_s) mais frequente (42,9%) na série analisada varia entre 0,5 e 1 m.

Quadro 5: Diagrama de ocorrência conjunta de altura significativa (H_s) e direção de ondas (Dir) gerado a partir dos dados propagados com o modelo SWAN e reconstruídos com o método do Hiper cubo.

Hs \ Dir	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Num. Casos	Frequência	Hs Med	Hs Max
0 - 0.5		232	5902	1847	1209	701	667	4357	7532	466	6						22919	12.05	0.39	0.50
0.5 - 1			6719	16842	18426	5195	3763	12769	17592	351							81657	42.92	0.75	1.00
1 - 1.5			1	3166	19282	5515	2853	7421	7340	42							45620	23.98	1.19	1.50
1.5 - 2				9	2077	1603	1290	3995	2114								11088	5.83	1.68	2.00
2 - 2.5					43	290	364	1631	354								2682	1.41	2.18	2.50
2.5 - 3					1	24	62	383	18								488	0.26	2.68	3.00
3 - 3.5						15	5	78	2								100	0.05	3.13	3.48
3.5 - 4								1									1	0.00	3.53	3.53
Num. Casos		232	12622	21864	41038	13343	9004	30635	34952	859	6									
Frequência		0.12	6.63	11.49	21.57	7.01	4.73	16.10	18.37	0.45	0.00									
Hs Min		0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01									
Hs Med		0.10	0.52	0.79	1.02	1.08	1.08	1.04	0.83	0.52	0.02									
Hs Max		0.18	1.00	1.66	2.50	3.29	3.17	3.53	3.02	1.27	0.04									

O Quadro 6 apresenta a distribuição de ocorrência conjunta dos dados período de pico (T_p), em segundos, e direção de ondas (Dir), em graus, gerado a partir da série reconstruída próximo à área de estudo. As ondulações de Leste representam 21,57% das ondas que ocorrem na região e apresentam os períodos mais frequentes em torno de 6-8 s (28,5%), sendo essas geradas próximas da área de estudo. Já as ondulações do quadrante Sul (18,3%) apresentam os períodos mais longos, de 10-12 s, indicando que a área de estudo está a uma maior distância do centro de geração.

Quadro 6: Diagrama de ocorrência conjunta de período de pico (T_p) e direção de ondas (Dir) gerado a partir dos dados propagados com o modelo SWAN e reconstruídos com o método do Hipercubo.

Tp \ Dir	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Num. Casos	Frequência	Tp Min	Tp Med	Tp Max
0 - 2																					
2 - 4	94	604	115	9	17	22	36	61	167	6							1131	0.59	2.70	3.62	4.00
4 - 6	138	8082	4447	1371	555	427	225	391	376								16012	8.42	4.01	5.27	6.00
6 - 8		3851	15382	24911	5699	1811	912	1436	281								54283	28.53	6.01	7.03	8.00
8 - 10		85	1628	13832	5675	3550	4710	8410	35								37925	19.93	8.01	8.84	10.00
10 - 12			292	504	1245	1765	8510	17578									29894	15.71	10.01	10.99	12.00
12 - 14				261	128	967	9422	6877									17655	9.28	12.01	12.78	14.00
14 - 16				114	18	369	5563	199									6263	3.29	14.01	14.69	16.00
16 - 18				29	5	66	1084										1184	0.62	16.01	16.72	18.00
18 - 20				7	1	16	155										179	0.09	18.02	18.91	19.98
20 - 22						7	17										24	0.01	20.01	20.86	21.93
22 - 24						4	1										5	0.00	23.22	23.45	23.59
24 - 26																					
Num. Casos	232	12622	21864	41038	13343	9004	30635	34952	859	6											
Frequência	0.12	6.63	11.49	21.57	7.01	4.73	16.10	18.37	0.45	0.00											
Tp Min	2.91	2.70	3.00	2.97	3.08	3.27	2.92	2.75	2.81	2.90											
Tp Med	4.15	5.53	6.70	7.68	8.16	9.49	12.07	10.69	5.47	3.53											
Tp Max	5.09	8.89	11.78	19.40	18.17	23.59	23.22	15.02	8.85	3.95											

O Quadro 7 mostra que 42,9% das ondas na região apresentam altura significativa entre 0,5 e 1 m, sendo que a faixa de período de maior frequência de ocorrência é de 6-8 s (28,5%).

Quadro 7: Diagrama de ocorrência conjunta de altura significativa (Hs) e período de pico (Tp) gerado a partir dos dados propagados com o modelo SWAN e reconstruídos com o método do Hipercubo.

Hs \ Tp	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20	20 - 22	22 - 24	24 - 26	Num. Casos	Frequência	Tp Min	Tp Med	Tp Max
0 - 0.5		1093	5161	2302	4170	5438	2878	1314	436	105	17	5		22919	12.05	2.70	7.86	23.59
0.5 - 1		38	10244	31778	15089	14501	7117	2332	493	58	7			81657	42.92	3.78	7.88	21.41
1 - 1.5			607	18740	13735	6508	4483	1364	168	15				45620	23.98	5.01	8.36	19.48
1.5 - 2				1411	4258	2374	2158	835	51	1				11088	5.83	6.06	9.73	18.07
2 - 2.5				52	646	876	759	317	32					2682	1.41	7.21	11.08	17.85
2.5 - 3					25	170	214	75	4					488	0.26	8.45	12.15	16.54
3 - 3.5					2	27	46	25						100	0.05	9.85	12.65	15.97
3.5 - 4								1						1	0.00	14.31	14.31	14.31
Num. Casos		1131	16012	54283	37925	29894	17655	6263	1184	179	24	5						
Frequência		0.59	8.42	28.53	19.93	15.71	9.28	3.29	0.62	0.09	0.01	0.00						
Hs Min		0.01	0.01	0.02	0.01	0.09	0.12	0.07	0.15	0.15	0.27	0.27						
Hs Med		0.19	0.52	0.86	0.86	0.86	1.00	1.00	0.74	0.53	0.43	0.33						
Hs Max		0.64	1.46	2.30	3.22	3.29	3.31	3.53	2.91	1.85	0.78	0.40						




3.6.2 Redução dos Dados de Ondas

Após a transferência da série de dados de ondas de águas profundas para águas rasas com o método do hipercubo, foi possível selecionar os casos de ondas para a modelagem morfodinâmica. Para selecionar os casos de ondas foi utilizada uma rotina elaborada em ambiente MATLAB® que percorre a série de dados de ondas em águas profundas e águas rasas, calcula o fluxo de energia associado às ondas de cada registro e delimita um intervalo de direções em águas profundas que inclui 95% da energia das ondas observadas em águas rasas (Figura 26). Os dados de ondas em águas profundas que se encontram dentro dessa janela foram divididos em 4 setores direcionais, de modo que cada setor possua o mesmo valor de fluxo de energia. Cada setor direcional foi dividido em 5 classes de altura (também pelo seu fluxo de energia), resultando em um total de 20 classes, e inserida uma classe de calmaria, totalizando 21 classes (Figura 27). Para cada classe foi selecionado um caso de onda que é representativo do seu fluxo médio de energia. Em função da sua frequência de ocorrência no registro completo de dados, os 21 casos são propagados por um determinado número de ciclos de maré simplificada (item 3.6.3) e geram diferentes valores para o parâmetro de aceleração morfológica *morfac*.

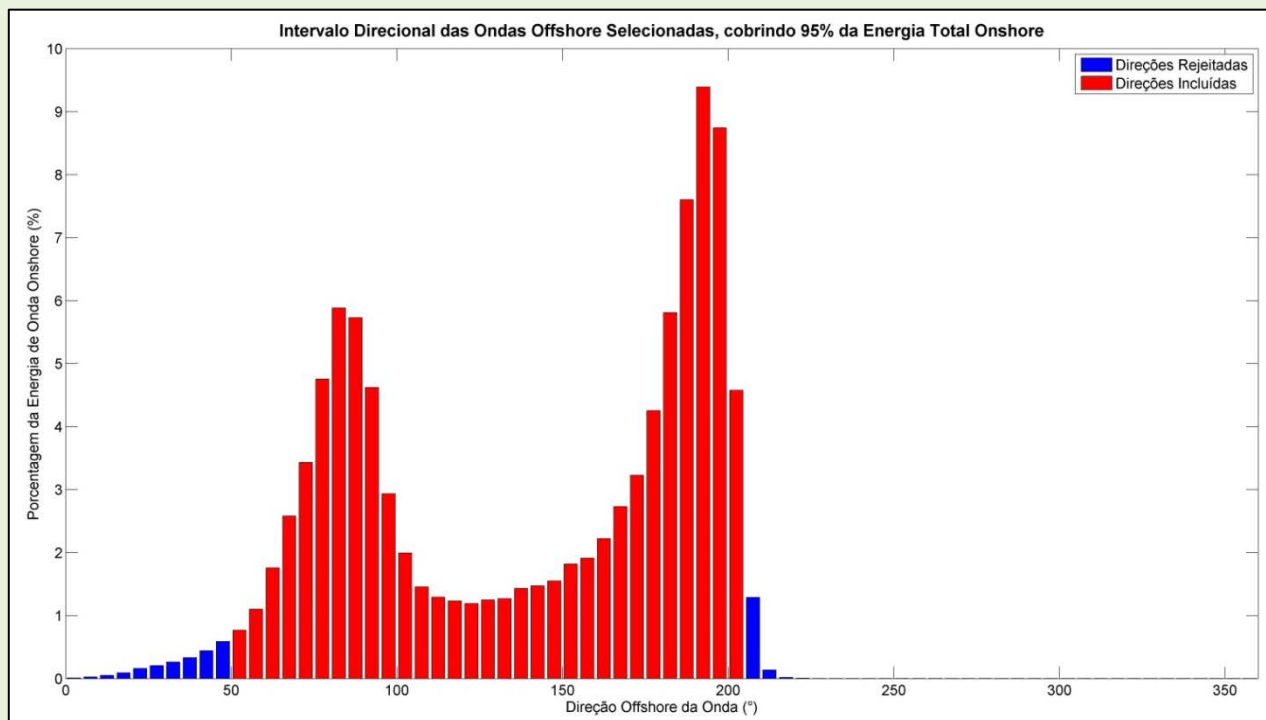


Figura 26: Intervalo de direções em águas profundas que cobrem 95% da energia observada na praia.

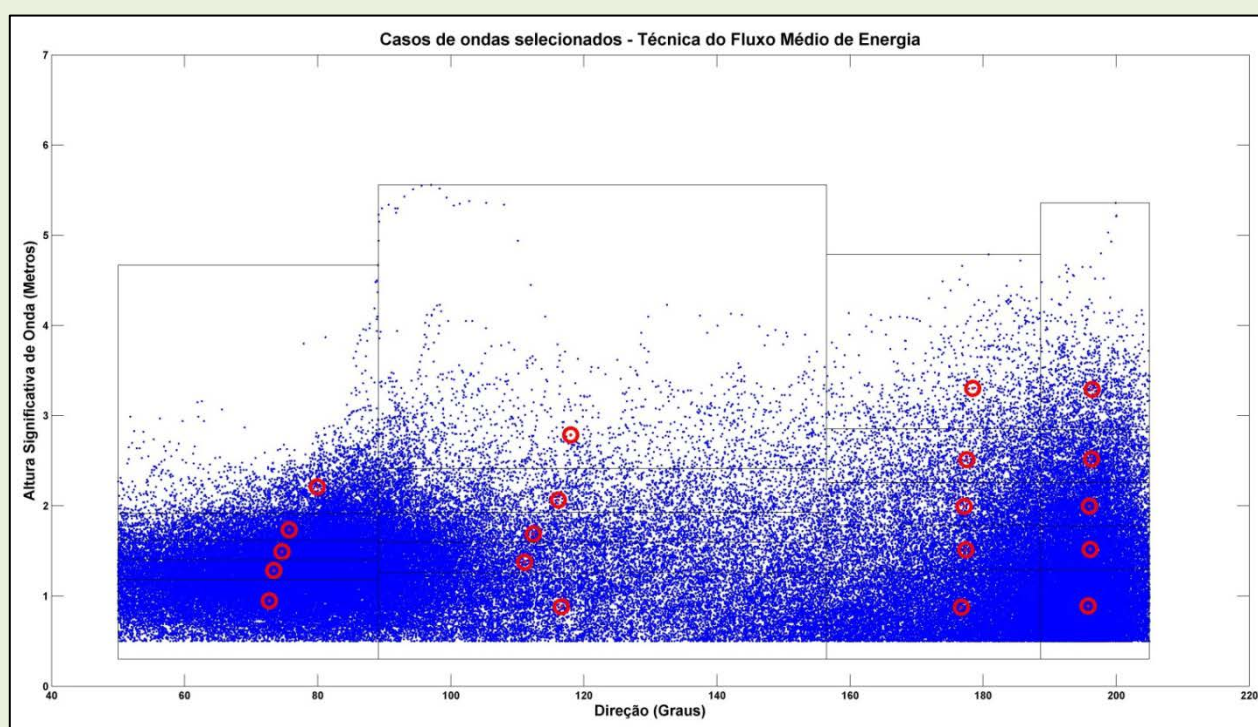


Figura 27: Classes selecionadas pelo método do fluxo de energia e casos representativos de cada classe (pontos vermelhos).

Na Tabela 4 são apresentadas as características de cada caso de onda selecionado, com o respectivo fator de aceleração morfológica utilizado. O *Morfac* apresentado corresponde ao valor usado para simulação total, de 1 ano. Para as simulações de 5 (cinco) anos, este primeiro ano foi replicado mais quatro vezes em sequência.

Para a simulação de cada caso, espectros de ondas do tipo Jonswap (*Joint North Sea Wave Project*) foram inseridos nas fronteiras do modelo numérico de propagação de ondas, através das especificações dos seguintes parâmetros: altura significativa de onda (H_s), período de pico do espectro (T_p), direção associada ao pico do espectro (Dir) e espalhamento direcional (Spr). O espalhamento direcional foi definido conforme proposto por Hartog *et al.* (2008) e Benedet e List (2008) com base no período de pico. Estados de mar com período de picos maiores, característicos de marulho (swell), apresentam menor espalhamento direcional, enquanto estados de mar com períodos de pico menores, comumente associados a vagas (*wind seas*), apresentam maior espalhamento direcional.

A gravidade foi assumida como sendo $9,81 \text{ m/s}^2$ e a densidade da água como 1025 kg/m^3 . O modelo de quebra de ondas induzida pela profundidade foi o de Battjes & Janssen (1978) com parâmetros $\alpha=1$ e $\gamma=0,73$. O modelo ainda considerou os processos de refração induzida pelo fundo e por interação onda-corrente e interações onda-onda do tipo *frequency-shift*.

Tabela 4: Características dos casos de ondas selecionados e seus respectivos fatores de aceleração morfológica (*morfac*).

Caso	Hs	Tp	Dir	MORFAC
1	0,88	10,92	176,76	64,17
2	1,49	7,52	74,64	35,92
3	2,00	12,10	195,98	16,82
4	0,95	6,95	72,72	89,64
5	1,38	8,17	111,11	31,13
6	0,89	11,58	195,79	84,39
7	1,29	7,24	73,40	50,67
8	2,07	8,55	116,17	14,22
9	1,51	10,99	177,41	21,91
10	1,73	7,82	75,71	26,72
11	2,00	11,02	177,17	12,75
12	3,29	12,96	196,42	5,88
13	2,21	8,42	79,92	14,57
14	2,51	11,27	177,54	8,06
15	0,88	8,64	116,64	66,12
16	1,52	11,80	196,11	29,32
17	2,52	12,55	196,29	10,46
18	3,30	12,02	178,45	4,33
19	1,69	8,28	112,39	21,10
20	2,79	9,40	118,01	7,40
21	0,50	6,00	45,00	89,93

3.6.3 Maré Simplificada

O objetivo de redução dos dados de maré utilizados como forçante no modelo morfológico é substituir o padrão complexo da maré real da região por uma maré simplificada, ou maré morfológica. Idealmente, a maré simplificada, deve produzir o mesmo transporte residual de sedimentos e padrão de mudanças morfológicas que a maré real, em todos os pontos da região de interesse (LESSER, 2009).

A redução dos dados de maré real a uma senoidal com periodicidade constante permite que cada caso de onda seja propagado por, no mínimo, um ciclo completo de variação do nível d'água. Dessa forma, todos os casos de onda sofrem influência da mesma amplitude e fase de maré.

A metodologia de redução utilizada no presente estudo considera uma onda com ciclo semi-diurno, com período equivalente à componente principal lunar M2 (12,42107 horas) e amplitude variando entre os níveis Médio de Baixa-Mares (MLW - Mean Low Water) e Médio das Preamares (MHW - Mean High Water), oscilando em relação ao nível médio (Figura 28).

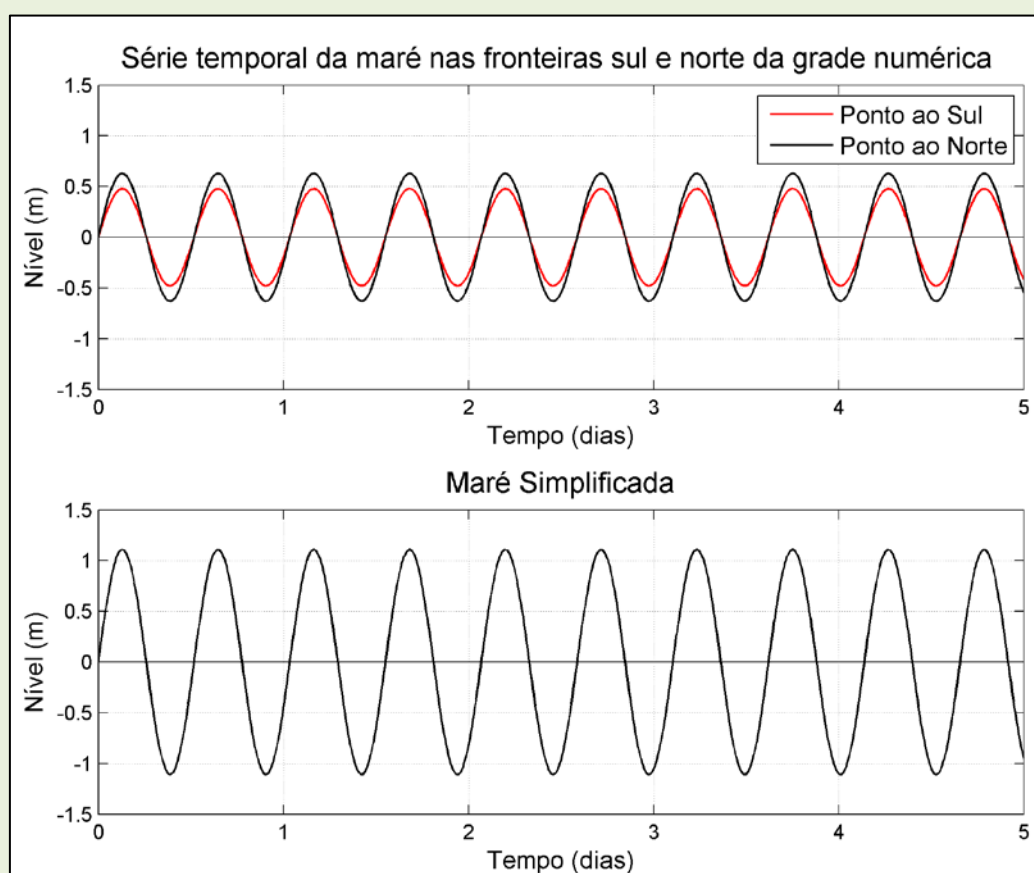


Figura 28: Série de maré simplificada adotada nas simulações morfodinâmicas. Figura superior corresponde as séries forçadas nas fronteiras norte e sul da grade numérica. Figura inferior corresponde a série adotada na simulação morfológica, resultante da soma das duas séries.

3.6.4 Técnica de Aceleração Morfológica

O uso de modelos morfológicos baseados em processos (*process-based numerical morphological models*) aplicados em modo de diagnóstico ou prognóstico do tipo *brute-force* (forçamento com série temporal bruta), para simulação da evolução morfológica, requer algumas explicações: o modelo é executado para um período de simulação designado, iniciado a partir de uma condição inicial especificada. Durante a simulação, séries temporais das condições forçantes devem ser especificadas. Para simulações em modo diagnóstico, estas forçantes normalmente consistem em uma série de dados medidos/previstos de nível d'água, intensidade e direção dos ventos, pressão atmosférica, descarga fluvial e/ou ondas oceânicas. Para simulações prognósticas, devido à natureza estocástica dos ventos, ondas e outros processos forçadores, são necessárias algumas considerações especiais, frequentemente resultando no uso de uma série temporal derivada da média anual ou climas sazonais, bem como testes de sensibilidade dos desvios ao redor desta média.

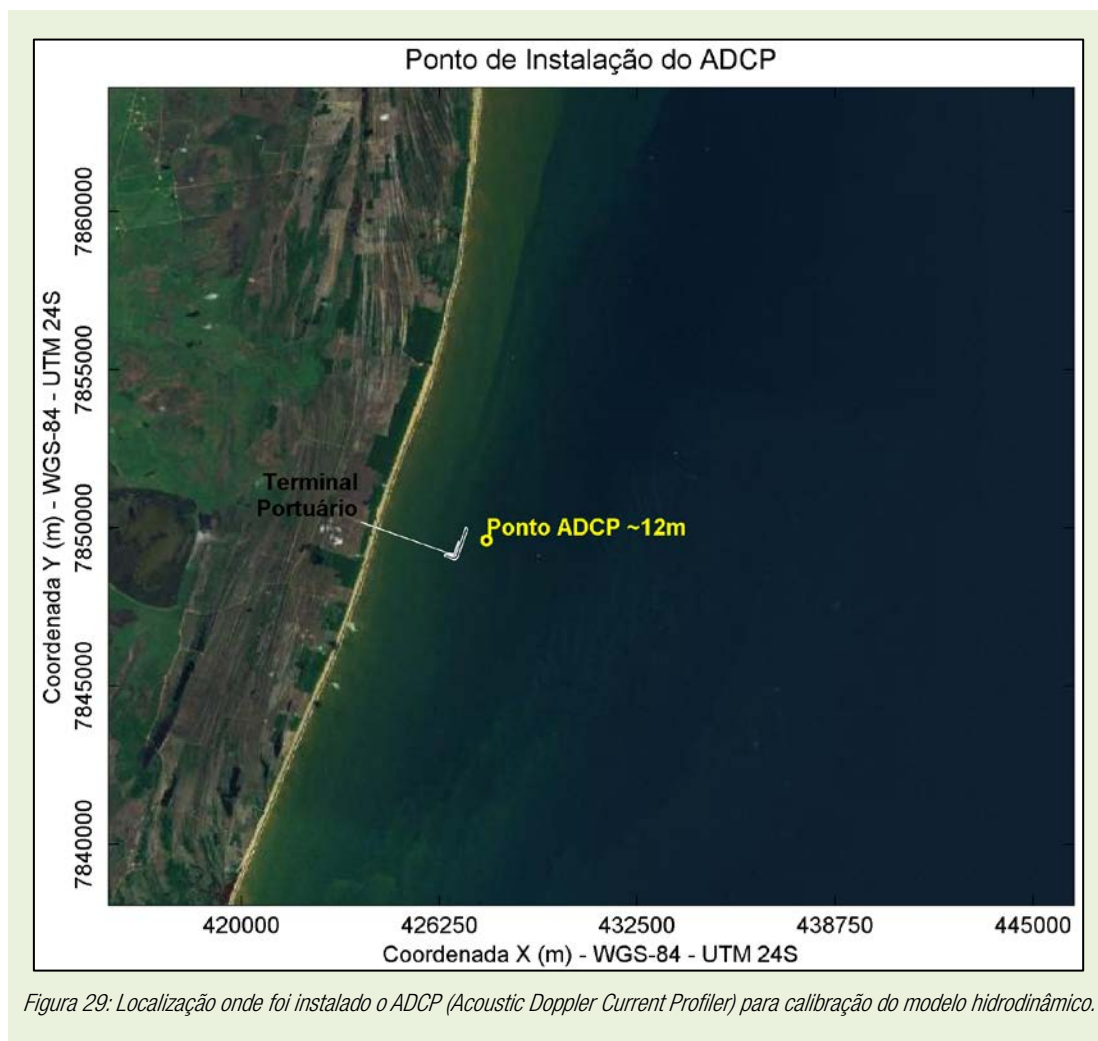
Simulações do tipo *brute-force* são usadas para investigar com detalhe o desenvolvimento histórico-temporal das variações morfológicas e investigar o impacto relativo dos processos associados. No entanto, esse tipo de modelagem é extremamente dispendioso computacionalmente e, dependendo da resolução, diversidade de processos simulados e da capacidade do hardware do computador disponível, será frequentemente executado em uma velocidade apenas 10 vezes mais rápida que o tempo real (e.g. 100 dias de simulação requereriam 10 dias de computação). Isso significa que, quando estamos interessados em resolver processos de mudanças morfológicas da ordem de meses ou anos, técnicas de aceleração morfológica do modelo são necessárias para reduzir o tempo de processamento.

A abordagem utilizada no presente estudo utiliza um parâmetro de aceleração morfológica (*morfac* – *morphological acceleration factor*), que resulta num tempo computacional até 10 vezes inferior quando comparado ao método brute-force. O *morfac* é atrativo porque é numericamente eficiente, robusto e simples de implementar. A abordagem do *morfac* trabalha multiplicando o fluxo de erosão/sedimentação dos sedimentos em suspensão e os gradientes das componentes vetoriais de transporte por fundo (*bed load transport*) por um fator espacialmente constante (*morfac*). Esse procedimento efetivamente multiplica todas as mudanças de elevação do fundo que ocorrem durante um passo de tempo do modelo hidrodinâmico pelo fator *morfac* e, pode-se dizer, efetivamente, que o passo de tempo morfológico torna-se tantas vezes que for o *morfac* maior que o passo de tempo do modelo hidrodinâmico. Essa abordagem é adequada para simulações morfológicas de longo-prazo (anos ou décadas), pois as mudanças morfológicas ocorrem em escalas temporais distintas das variações na hidrodinâmica (Lesser et al., 2004; Lesser, 2009; Benedet e List, 2008).

3.7 DADOS PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

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 e observações de campo, de forma que quanto melhor o ajuste entre estes valores, melhor o resultado fornecido pelo modelo.

O modelo hidrodinâmico foi devidamente calibrado com dados elevação de nível, magnitude e direção da corrente, direção, altura e período das ondas medidos em região adjacente ao terminal portuário, pelo equipamento ADCP (*Acoustic Doppler Current Profile*) instalado em profundidade aproximada de 12 metros apresentado na Figura 29. O período de aquisição do equipamento foi do dia 20 de Julho de 2012 a 30 de Agosto de 2012, compreendendo 42 dias. O modelo de calibração compreendeu todos os 42 dias de aquisição de dados do ADCP.



Os modelos hidrodinâmico e morfológico foram simulados em 3 dimensões, com 5 camadas na vertical, utilizando coordenadas sigma, sendo que cada camada corresponde a 20% da profundidade no ponto de grade. Os parâmetros de calibração utilizados no modelo hidrodinâmico são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros de calibração do modelo hidrodinâmico.

PARÂMETRO DE CALIBRAÇÃO	VALORES UTILIZADOS
Passo de tempo	0,5 min
Coefficiente de Rugosidade - Chezy	105
Coefficiente de viscosidade turbulenta	2 [m ² /s]
Coefficiente de arrasto do vento	0 m/s --> 0,0008
	1 m/s --> 0,002
	50 m/s --> 0.007

3.7.1 Maré

Para a calibração do modelo hidrodinâmico, os dados de maré utilizados foram provenientes do banco de dados do Tide Model Driver (TMD), para dois pontos próximos as fronteiras norte e sul da grade numérica (Tabela 6). O TMD é um sistema que permite acessar as constituintes harmônicas das marés para qualquer região do globo, geradas pela família de modelos ESR/OSU, incluindo oito componentes primárias (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1), duas componentes de longo período (MF, MM) e três componentes não-lineares (M4, MS4 e MN4). As constantes harmônicas utilizadas em cada ponto são apresentadas na Tabela 7

Tabela 6 – Coordenadas geográficas dos pontos de maré extraídos do modelo TMD.

	Longitude	Latitude
Norte	39°33' 51.97" O	19° 9' 2.97" S
Sul	39° 43' 12.63" O	19° 46' 14.30" S

Tabela 7 – Componentes harmônicas da maré do modelo TMD utilizadas na simulação numérica.

Componente	Norte		Sul	
	Amplitude (cm)	Fase (°)	Amplitude (cm)	Fase (°)
M2	63.09	177.13	47.86	176.72
S2	28.84	190.08	21.56	189.84
N2	9.93	175.54	7.69	178.92
K2	8.11	185.37	6.27	184.48
K1	4.74	211.32	4.68	206.82
O1	8.83	145.88	8.58	141.08
P1	1.61	201.89	1.56	198.76
K1	2.39	117.69	2.35	115.47
MF	1.07	354.34	0.98	355.54
MM	0.54	352.27	0.51	352.11
M4	1.94	340.66	0.74	288.04
MS4	0.62	355.46	0.27	319.02
MN4	0.41	280.86	0.32	213.23

Para representar o efeito do gradiente de nível entre o banco de Abrolhos e as regiões adjacentes (ver item 2.1.1), levou-se em consideração a escala espacial das variáveis. O banco de Abrolhos possui 250 km de comprimento e a grade numérica apenas 30 km, localizada justamente na interface entre o banco e o fim do mesmo. Para isto, afastou-se cerca de 20 km para norte e sul dos limites da grade os pontos de extração das constantes harmônicas de entrada no modelo hidrodinâmico. Esta distância se mostrou satisfatória para representar o efeito da maré na região de estudo. A previsão de maré das constantes harmônicas extraídas está apresentada na Figura 30, onde fica clara a diferença de nível de água entre esses dois pontos, aproximadamente 45 cm em 70 km de linha de costa, o que equivale a aproximadamente 0,64 cm por quilômetro.

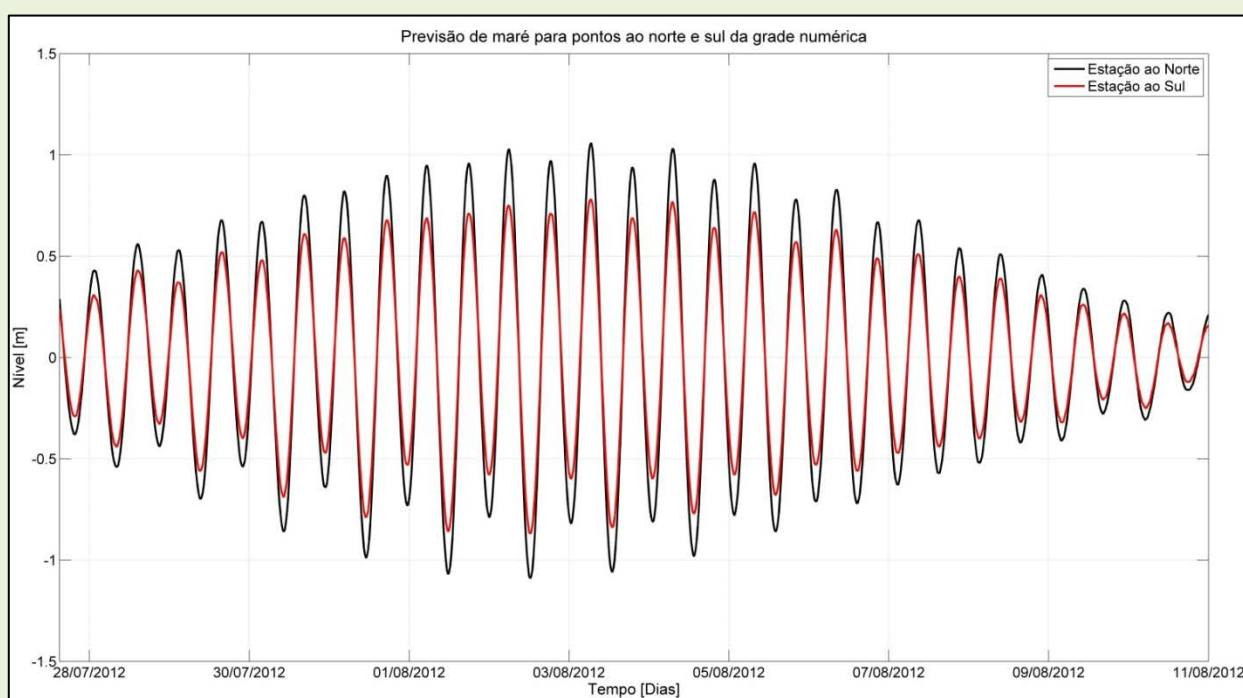


Figura 30: Previsão de maré dos pontos ao norte e sul da grade numérica, representando a diferença de nível entre as duas localidades.

3.7.2 Ventos

A série de ventos utilizada no modelo de calibração é proveniente de dados 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. O ponto de extração da série é nas coordenadas geográficas 39°15' O, 19°15' S. Na Figura 31 é apresentado um gráfico *stickplot* da magnitude e direção do vento para o período de calibração.

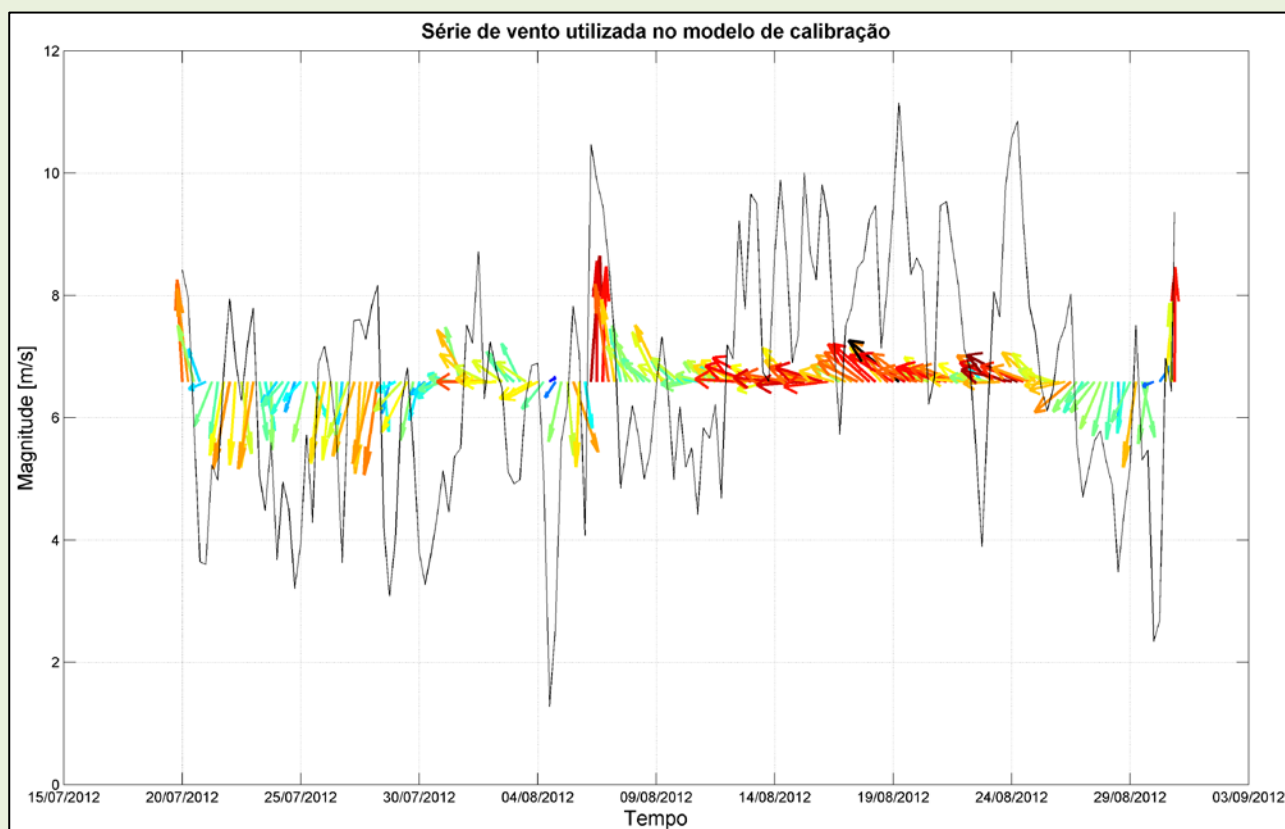


Figura 31: Série de ventos do modelo CFSR utilizada no modelo de calibração. Linha sólida em preto corresponde a magnitude e os vetores representam a direção. As cores dos vetores também representam a magnitude, sendo azul valores menores e vermelho valores maiores.

3.7.3 Ondas

A série de ondas utilizada no modelo de calibração foi extraída do modelo global WaveWatchIII, para o ponto de coordenadas $18,5^{\circ}$ S e $37,5^{\circ}$ O, com resolução temporal de 3 horas abrangendo o mesmo período do dado medido. A rosa de onda, mostrando direção e altura das ondas é apresentada na Figura 32.

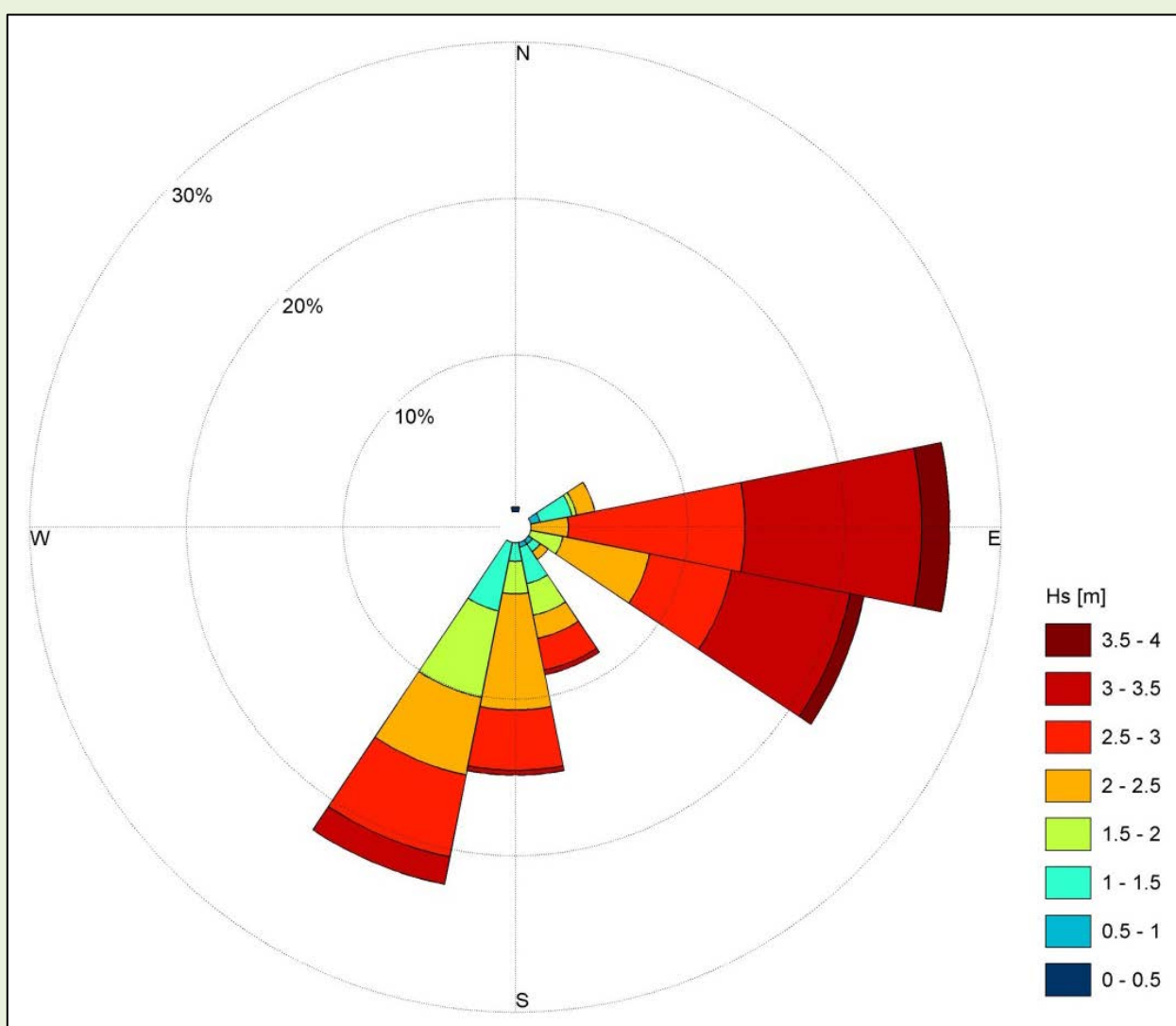


Figura 32: Série de ondas do modelo WaveWatchIII utilizada no modelo de calibração.

3.8 DADOS PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO MORFOLÓGICO

Para a calibração do modelo morfológico foram utilizados dados de perfis praias da região em torno do empreendimento, medidos em agosto de 2012 e janeiro de 2013 (Figura 33).

A calibração do modelo foi realizada de duas formas: comparando as curvas de variação da posição da linha de costa referentes aos dados medidos e aos modelados; e por meio das curvas de variação do volume erodido/acrescido dos perfis medidos e modelados.

Os principais parâmetros utilizados para ajuste do modelo foram os componentes de transporte de fundo em decorrência de correntes (Bed), de fundo em decorrência da ação de ondas (BedW) e de transporte em suspensão em decorrência da ação de ondas (SusW), além do fator de correlação entre o transporte de sedimento em suspensão e as correntes (Sus).

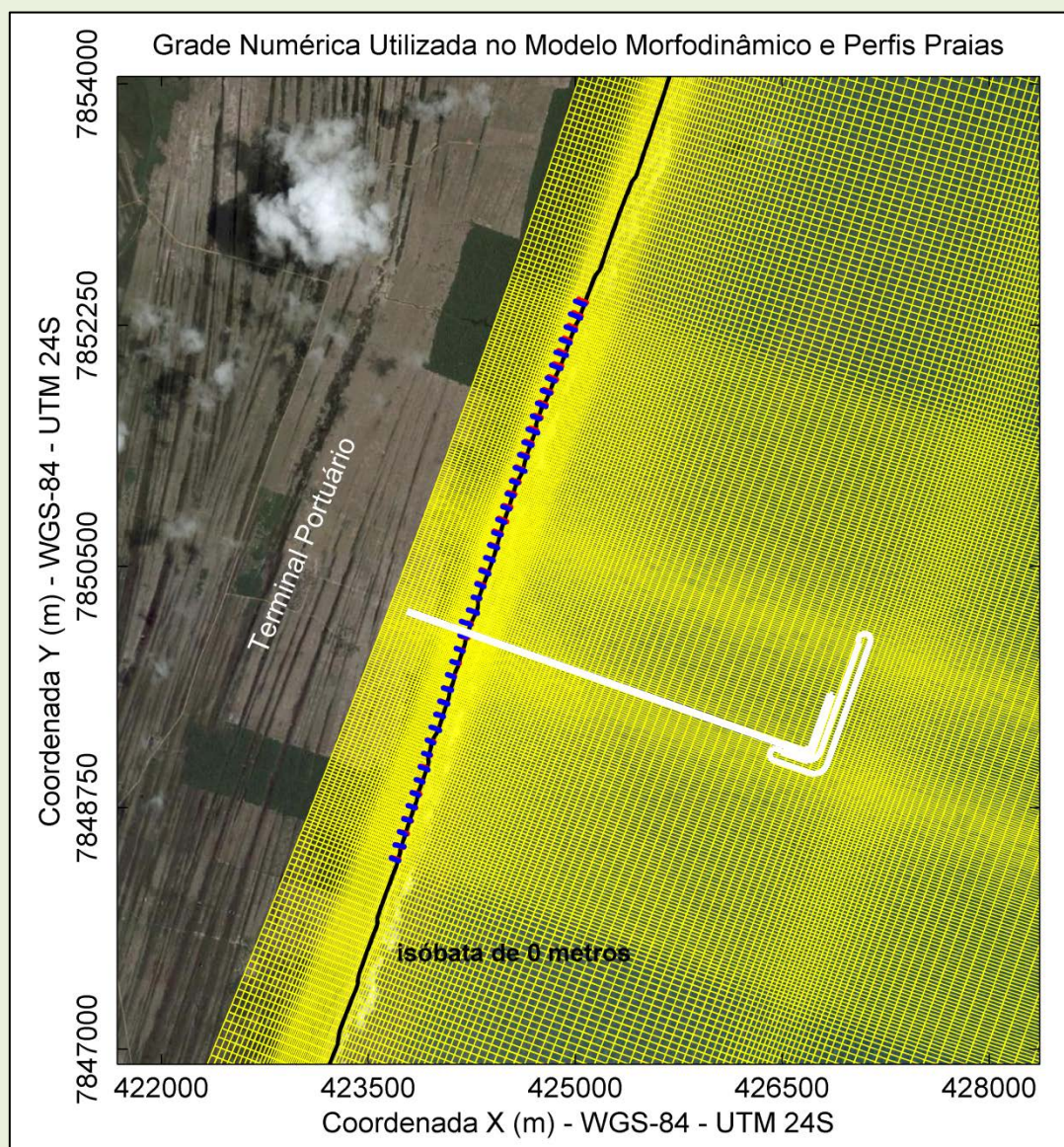


Figura 33: Grade numérica local utilizada no modelo morfodinâmico com destaque para os perfis praias disponibilizados pela contratante (em azul os perfis referentes ao inverno; em vermelho os referentes ao verão; em preto a isóbata de 0 metros; em branco as estruturas do terminal portuário).

Foram adotadas três granulometrias de sedimento. Na porção aérea da praia até a profundidade de fechamento foi utilizado grão com 0,5 mm (areia grossa). Nas áreas restantes, além da profundidade de fechamento, foram adotadas duas frações granulométricas (90% de areia fina e 10% de silte), baseado em amostragens realizadas pela Econservation. Estas amostras foram obtidas com testemunho de aproximadamente 1,5 metros de profundidade, coletados em Dezembro/2012 na região do futuro canal de acesso (Figura 34). As amostras apresentaram mediana de 90% de areia fina (0,2 mm) e 10% de silte (Figura 35).

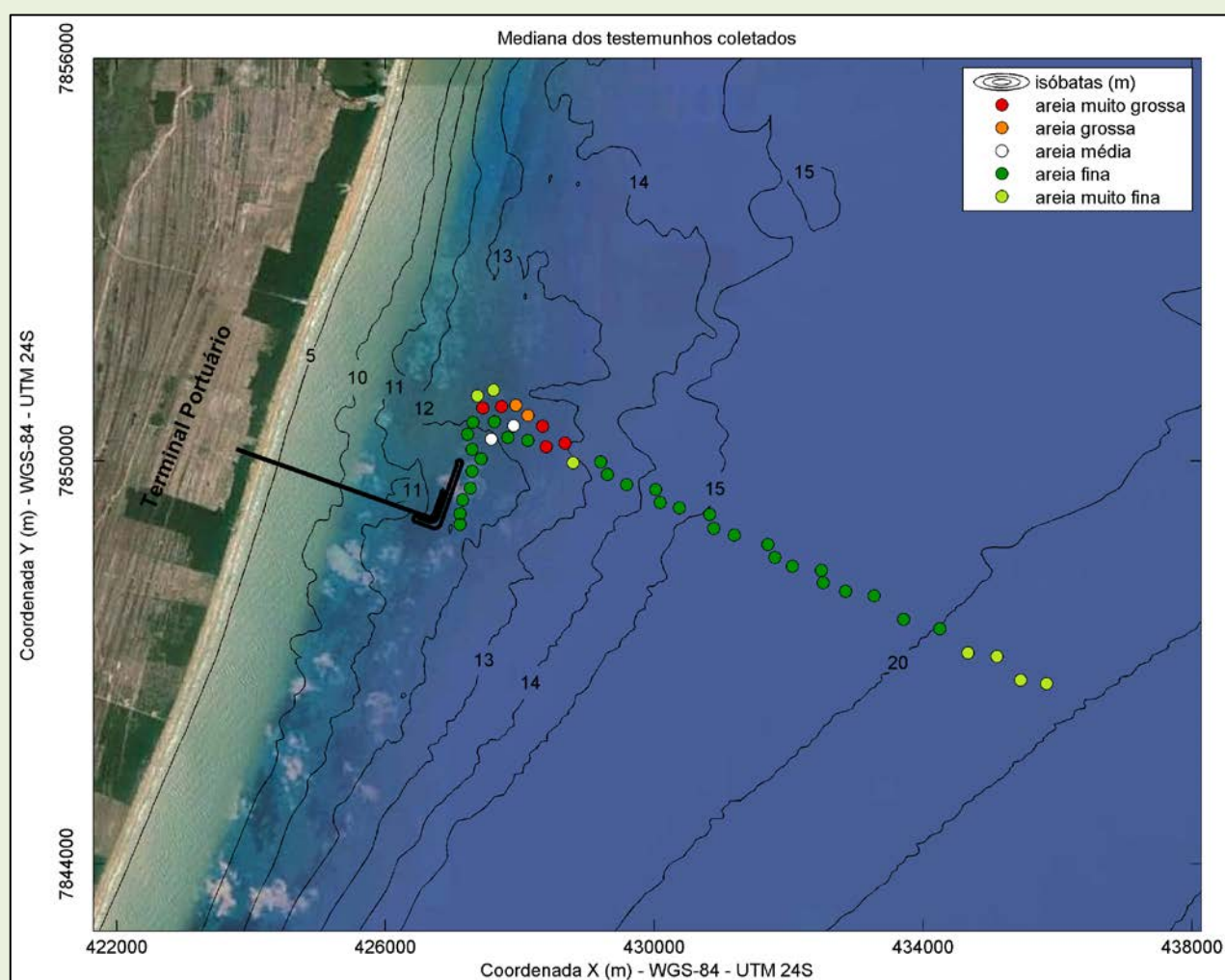


Figura 34: Mediana do sedimento marinho superficial. Dados disponibilizados pela Econservation.

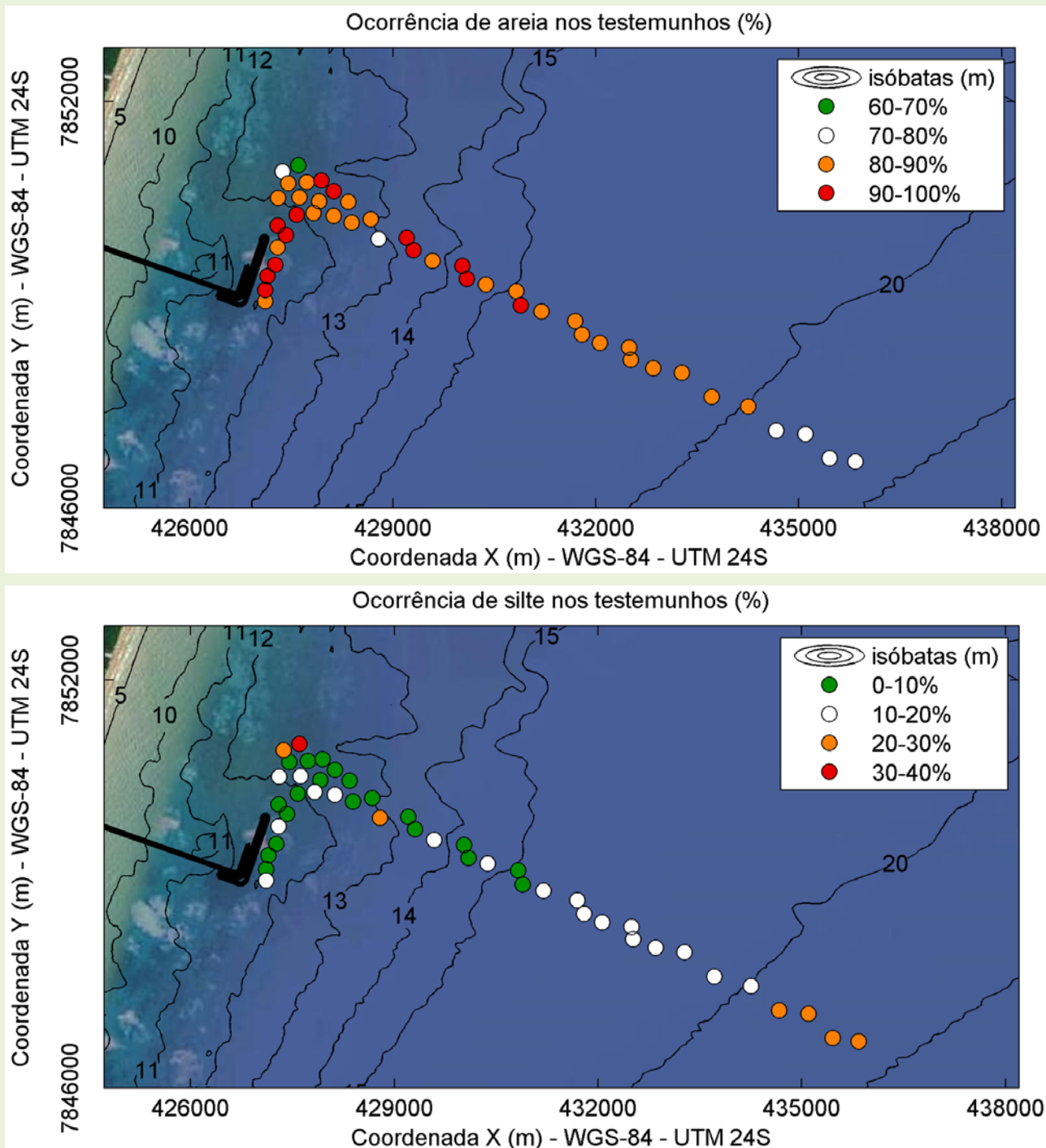


Figura 35: Porcentagem de areia fina (acima) e silte (abaixo) nas amostra de sedimento marinho superficial. Dados disponibilizados pela Econservation.

No Delft 3D-FLOW o molhe foi configurado como uma estrutura rígida e sem aberturas, e a ponte de acesso foi configurada como uma estrutura que permite a passagem do fluxo, porém com uma atenuação de energia, descrito no item 3.9.

3.9 ATENUAÇÃO DA CORRENTE POR ESTRUTURAS DE APOIO

No modelo hidrodinâmico Delft 3D-FLOW é possível representar numericamente estruturas que de alguma forma promovam a atenuação ou aceleração da velocidade da corrente. No caso da área de estudo está presente o píer de acesso ao terminal portuário e o cais de atracação, que possui como características pilares de sustentação que interferem no fluxo hidrodinâmico, gerando perda de energia na direção do fluxo. Por ser a região de atracação dos navios e ser caracterizada como uma estrutura vazada, esta foi considerada relevante no estudo hidrodinâmico.

O Delft3D-FLOW representa estruturas de atenuação de correntes com a equação do coeficiente de perda de energia, representado na forma de *Porous Plates*, cujo coeficiente de perda de energia é representado pela equação abaixo.

$$C_{perda-U} = \frac{N C_{arrasto} d_{pilar}}{2 \Delta y} \left(\frac{A_{tot}}{A_{efet}} \right)^2$$

Onde:

A_{tot} = área total da seção transversal (Profundidade média da célula vezes largura da célula da direção predominante do fluxo);

A_{efet} = área efetivamente molhada da seção transversal (Área total menos a área bloqueada pelos pilares);

$C_{arrasto}$ = coeficiente de arrasto do pilar (1,0 para pilar cilíndrico);

d_{pilar} = diâmetro do pilar em metros;

N = número de pilares em cada célula da grade.

O valor calculado do coeficiente de perda foi de 0,05, e utilizado para píer de acesso e cais de atracação.

3.10 MODELO MORFOLÓGICO DA ESTABILIZAÇÃO DA LINHA DE COSTA PÓS-OBRA

Para referência, a linha de costa utilizada neste estudo foi adotada como sendo o nível médio do mar (isóbata de zero metros).

A escala temporal do processo de evolução e estabilização da linha de costa após a construção do terminal é estimada em escala de décadas, atingindo entre 20 e 30 anos. Por este motivo, o modelo de estabilização da linha de costa utiliza os mesmo casos de ondas, porém com *morfac* multiplicado por dois (Tabela 8).

Tabela 8: Características dos casos de ondas selecionados e seus respectivos fatores de aceleração morfológica (*morfac*) para o modelo de estabilização da linha de costa.

Caso	Hs	Tp	Dir	MORFAC
1	0,88	10,92	176,76	128.34
2	1,49	7,52	74,64	71.84
3	2,00	12,10	195,98	33.64
4	0,95	6,95	72,72	179.28
5	1,38	8,17	111,11	62.26
6	0,89	11,58	195,79	168.78
7	1,29	7,24	73,40	101.34
8	2,07	8,55	116,17	28.44
9	1,51	10,99	177,41	43.82
10	1,73	7,82	75,71	53.44
11	2,00	11,02	177,17	25.5
12	3,29	12,96	196,42	11.76
13	2,21	8,42	79,92	29.14
14	2,51	11,27	177,54	16.12
15	0,88	8,64	116,64	132.24
16	1,52	11,80	196,11	58.64
17	2,52	12,55	196,29	20.92
18	3,30	12,02	178,45	8.66
19	1,69	8,28	112,39	42.2
20	2,79	9,40	118,01	14.8
21	0,50	6,00	45,00	179.86

4 Resultados

4.1 CALIBRAÇÃO

4.1.1 Calibração de Nível (Maré)

As séries de nível medido, sinal meteorológico, nível medido filtrado (sinal astronômico) e nível simulado, para o ponto de calibração (ADCP, profundidade de 12 m), são apresentados na Figura 36.

Nos dados de nível medidos foram eliminados os sinais de frequência submareal (maré meteorológica ou sinal meteorológico) através da aplicação de um filtro do tipo Godin ($A_{24}^2 A_{25}$)/(24²25) (Emery & Thomson, 1998). Um cálculo do erro médio quadrático ou RMSE (*Root Mean Square Error*) foi realizado para o procedimento de comparação entre o nível simulado e medido, seguindo a seguinte formulação:

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

Onde P representa a variável prevista e O a variável observada.

O período de calibração foi representado por um mês de simulação, o que corresponde a aproximadamente dois ciclos de marés, ou seja, duas situações de maré de sizígia e duas de quadratura. Este período é considerado suficiente para uma calibração sendo que seu resultado pode ser extrapolado para todo o período de simulação e qualquer ponto da grade.

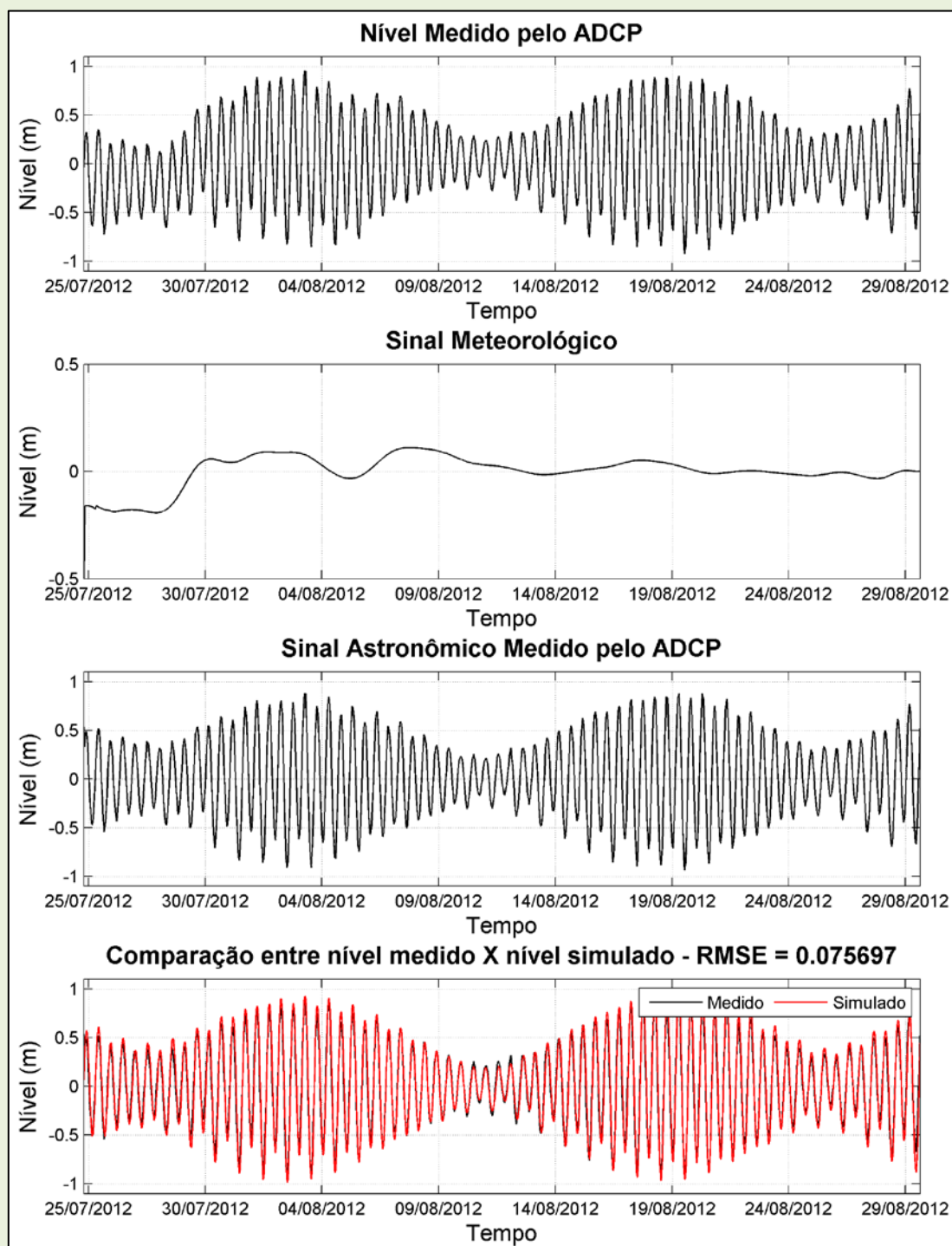


Figura 36: Comparação entre nível de água medido e nível simulado pelo modelo numérico.

A calibração apresentou como resultado um erro médio quadrático (RMSE) de 7 cm entre o nível medido (sem o sinal meteorológico) e o nível simulado pelo modelo, estando dentro da faixa estatística aceitável de 10% da variação total de maré no local de estudo que representa 160 cm aproximadamente (FEMAR, 2000). A comparação foi feita com a componente astronômica da maré, pois o modelo de calibração foi forçado com constantes harmônicas e não incluiu o efeito da maré meteorológica. Pelos dados medidos, verifica-se que a maré meteorológica possui amplitudes de até 20 cm e período de aproximadamente 8 dias.

4.1.2 Calibração de Correntes

Os resultados da calibração de correntes pelo modelo numérico estão apresentados na Figura 37.

A componente leste/oeste do vetor de velocidade apresentou valor de $RMSE$ igual a 0,07 m/s. É possível notar que a componente leste/oeste é praticamente nula, corroborando a afirmação de a corrente ser preferencialmente no sentido norte/sul, influenciada pela corrente de maré. A componente norte/sul do vetor de velocidade obteve $RMSE$ igual a 0,16 m/s, um pouco maior comparada a componente leste/oeste, porém considerado satisfatório. A magnitude da corrente apresentou $RMSE$ igual a 0,13 m/s.

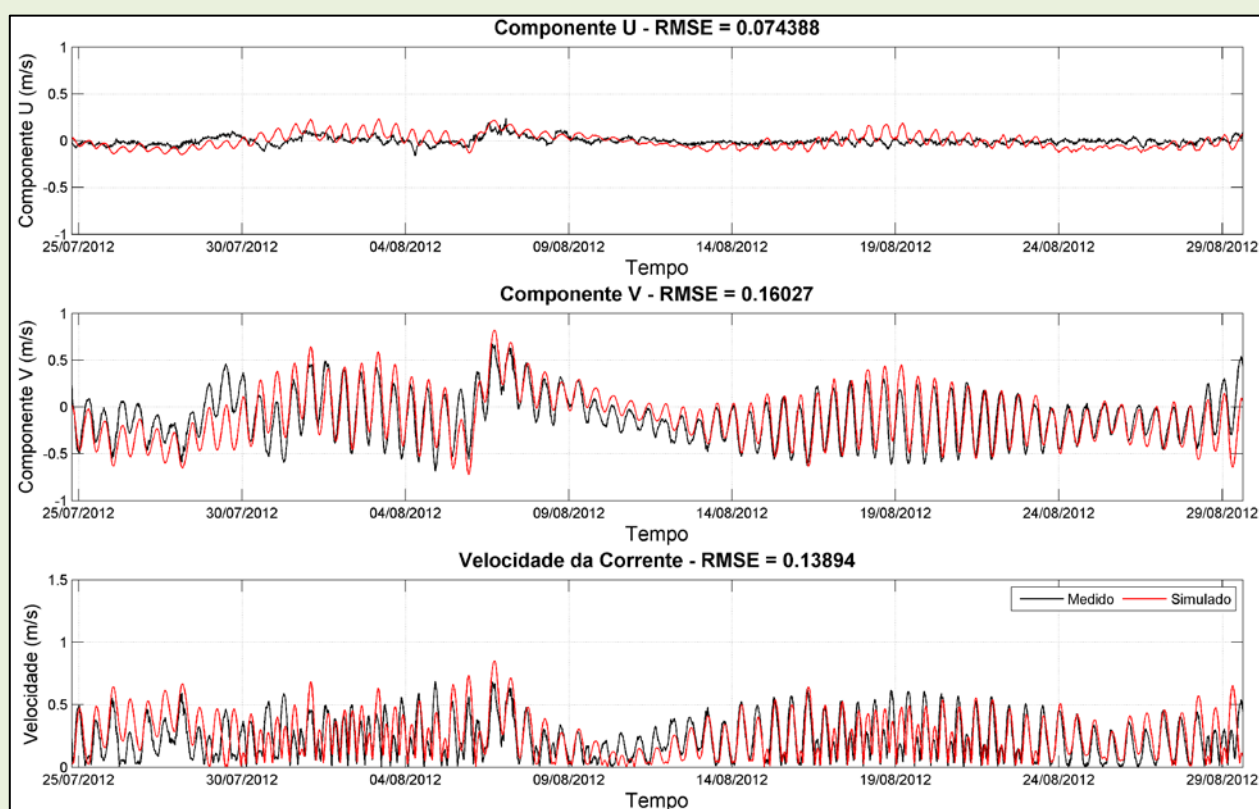


Figura 37: Comparação entre corrente medida e corrente simulada pelo modelo numérico.

4.1.3 Calibração de Ondas

Os resultados da calibração dos dados de onda (Altura Significativa, Período e Direção) são apresentados na Figura 38. Os $RMSE$ correspondentes estão apresentados na figura. O modelo de ondas foi forçado na grade externa com dados de ondas de águas profundas provenientes do modelo global WaveWatchIII. A calibração de onda indica não somente um bom ajuste dos parâmetros numéricos e físicos do modelo utilizado (SWAN), mas também que o modelo WaveWatchIII possui uma boa representatividade para o local.

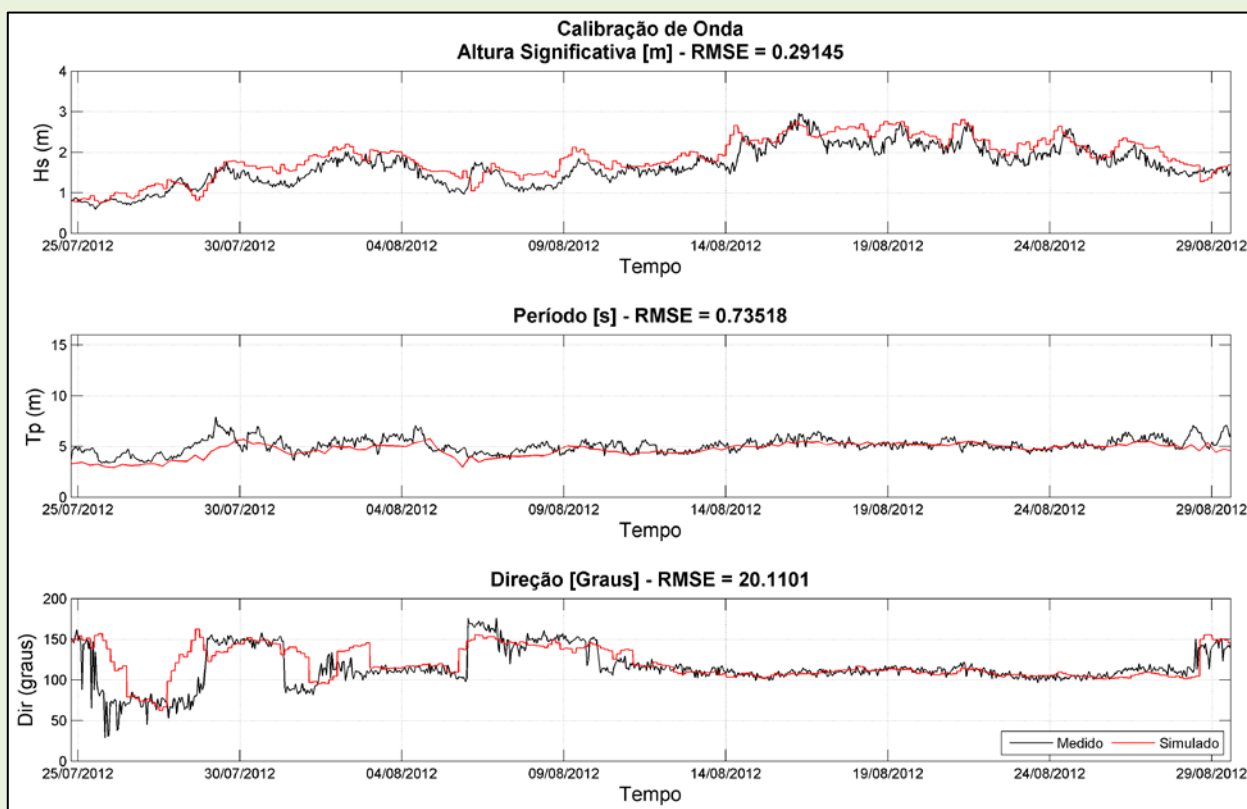


Figura 38: Comparação entre dados de onda medidos e simulados pelo modelo numérico.

4.1.4 Calibração do Modelo Morfológico

CALIBRAÇÃO PELA LINHA DE COSTA

Para a construção das curvas de progradação e retração da linha de costa, foram usadas como referência a isóbata 0 metros — referente ao nível médio do mar (MSL), e a isóbata de 0,58 metros — cota da preamar de sizígia somada ao NR para a estação maregráfica de Barra do Rio Doce (MHW). Basicamente, calculou-se a diferença entre a posição dessa linha entre os perfis medidos (agosto e janeiro), e a diferença entre a posição da linha entre os perfis modelados (com o modelo iniciando em agosto e finalizando em janeiro), a fim de determinar os valores de variação da linha de costa após seis meses.

Na Figura 39 pode ser observada a localização dos perfis medidos e o comportamento da linha de costa. Nos dois gráficos, o eixo vertical representa a linha de costa ao longo dos perfis medidos e no eixo horizontal a variação em metros. Valores menores que zero representam retração da linha de costa (erosão relativa) e valores maiores representam propagação da linha de costa (sedimentação relativa). Quanto mais próximo de zero, maior a estabilidade do perfil.

Entre os dois níveis de referência (MSL e MHW) não houve significativa diferença, sendo possível adotar qualquer uma dessas referências para as subseqüentes análises desse estudo. Adotou-se o MSL.

Entre os perfis medidos e os modelados observa-se um mesmo padrão e mesma faixa de magnitude na erosão/deposição dos sedimentos. Nos perfis localizados a norte da posição 7851000 m, percebe-se grande alternância entre erosão e deposição, estando possivelmente associada a presença de bermas/cúspides que ocasionam variações na posição das coletas.

De forma geral, observa-se um comportamento mais erosivo dos perfis modelados em relação aos perfis medidos, demonstrando o caráter conservador do modelo, o que minimiza as chances de problemas causados pela erosão na praia pós-obra.

O modelo morfológico foi considerado calibrado, estando os parâmetros de calibração listados abaixo (Tabela 5).

Tabela 9: Parâmetros de calibração do modelo morfológico.

PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO	VALORES UTILIZADOS
Tipo do sedimento	Areia Grossa
Diâmetro médio do sedimento	0.5 [mm]
Densidade do sedimento	1.6×10^3 [kg/m ³]
Sus	0.5
Bed	0.5
SusW	0.13
BedW	0.13

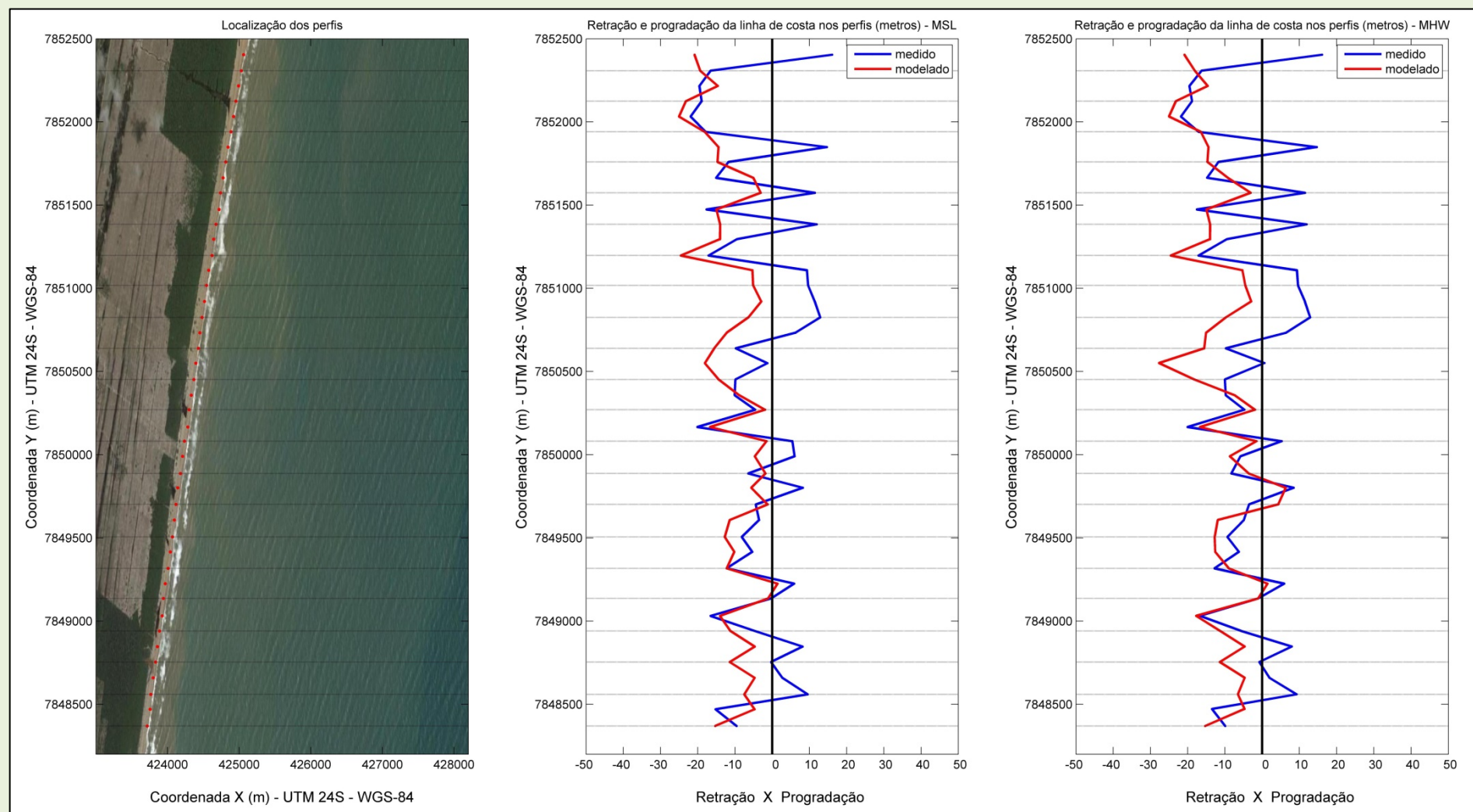


Figura 39: Retração e progradação da linha de costa nos perfis medidos e modelados para o período entre agosto de 2012 e janeiro de 2013, em MSL e MHW.

CALIBRAÇÃO PELA VARIAÇÃO DO VOLUME PRAIAL

A variação do volume de um perfil medido ou modelado em dois períodos diferentes pode ser obtida pela diferença entre o volume no tempo $1+x$ (futuro) e no tempo 1 (inicial), ilustrado na Figura 40. Variações negativas indicam tendência erosiva do perfil e valores positivos indicam tendência de deposição sedimentar.

Com o modelo devidamente calibrado pela posição da linha de costa, decidiu-se confirmar essa calibração utilizando o volume de sedimentos. Calculou-se a variação do volume sedimentar (m^3/m) entre os perfis medidos em agosto de 2012 e os perfis medidos em janeiro de 2013, e posteriormente entre os simulados para os mesmos períodos.

No gráfico da Figura 41, o eixo vertical representa a localização dos perfis e no eixo horizontal, a variação do volume sedimentar em m^3/m ao longo dos perfis medidos e modelados. Valores menores que zero representam erosão dos perfis e valores maiores representam sedimentação. Quanto mais próximo da linha zero está a variação do volume, maior a estabilidade do perfil. Pode ser observado na figura o mesmo padrão e magnitude na variação do volume dos perfis medidos e dos perfis modelados, sendo possível considerar o modelo morfológico também calibrado pelo volume praiar.

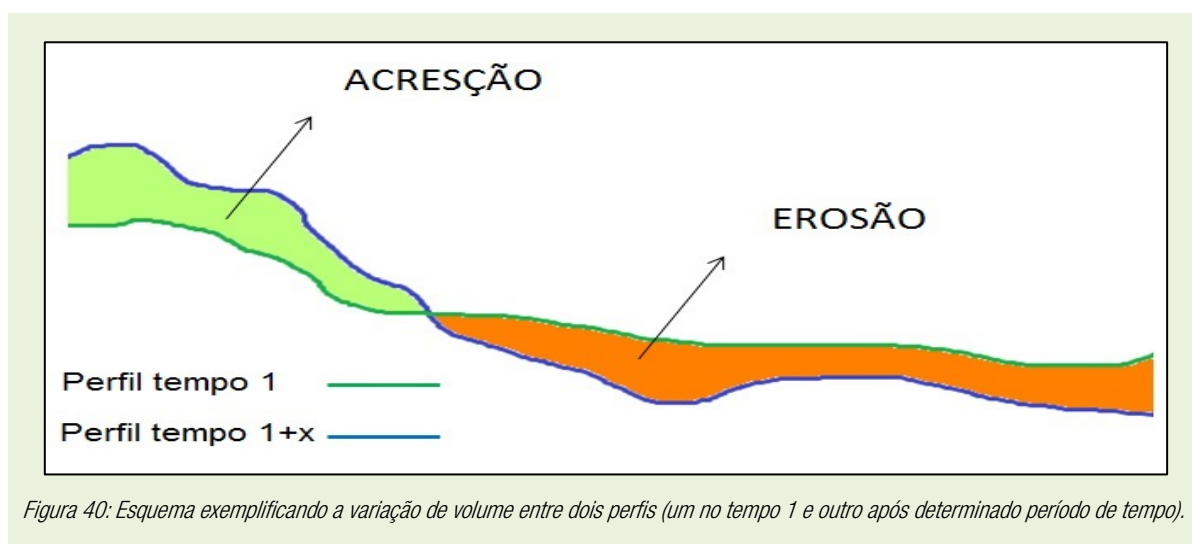


Figura 40: Esquema exemplificando a variação de volume entre dois perfis (um no tempo 1 e outro após determinado período de tempo).

Para os perfis medidos e modelados, os máximos volumes de deposição foram de $31 m^3/m$ e $4 m^3/m$, respectivamente, em um período de 6 meses. Os máximos valores de remoção de sedimentos foram de $77 m^3/m$ para os perfis medidos e $75 m^3/m$ para os modelados, para o mesmo período. Esse comportamento mais erosivo dos perfis modelados em relação aos perfis medidos demonstra o caráter conservador do modelo.

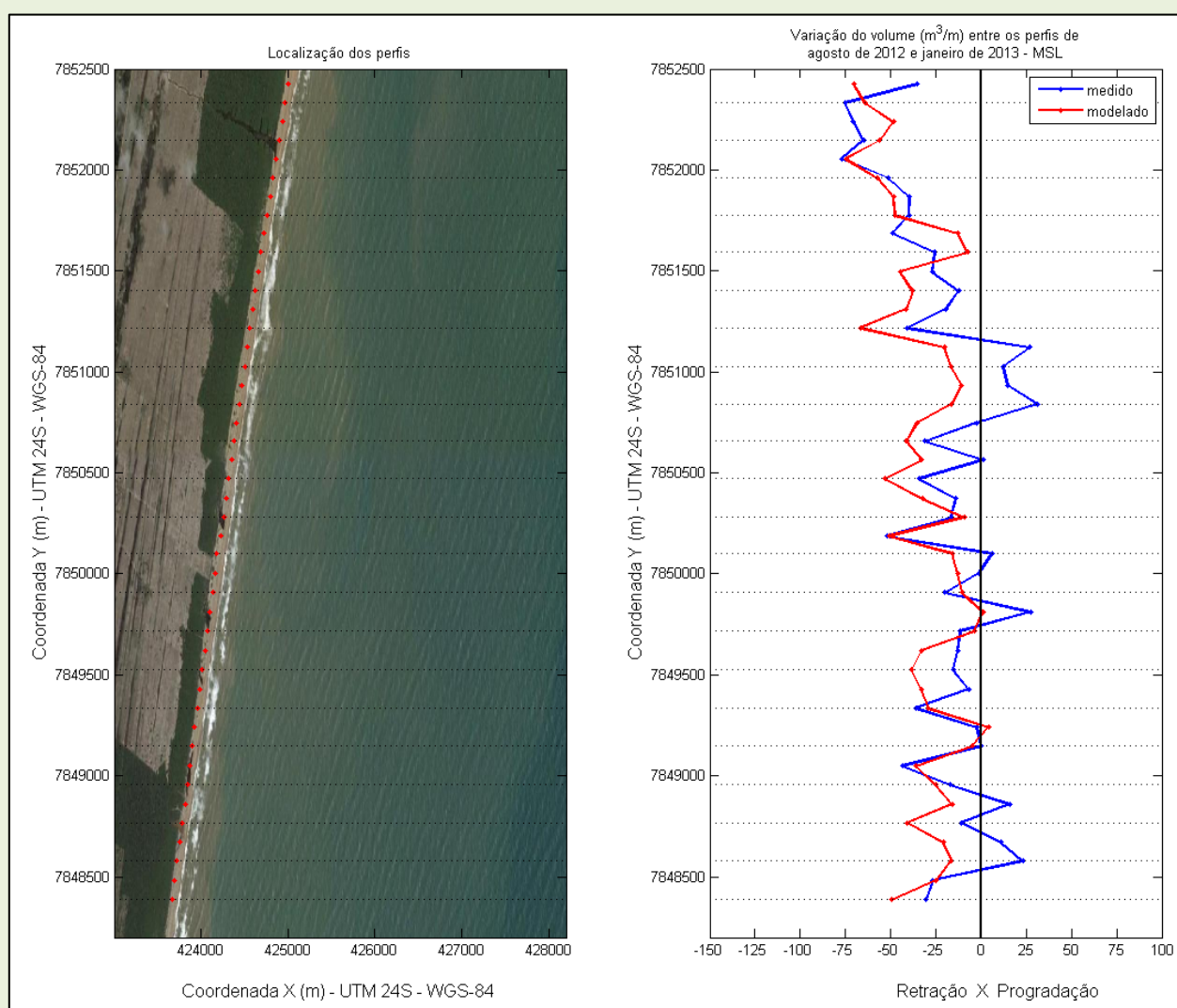


Figura 41: Variação do volume (m^3/m) nos perfis medidos e modelados para o período entre agosto de 2012 e janeiro de 2013, em MSL.

4.2 AVALIAÇÃO DO IMPACTO HIDRODINÂMICO

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.

4.2.1 Ondas

Da Figura 42 a Figura 47 são apresentados os resultados de impacto da estrutura e canal na propagação de ondas considerando 5 casos de ondas mais frequentes na região de estudo, representados na Tabela 10.

Tabela 10 – Casos de ondas propagados para avaliar efeito da implantação do terminal portuário.

Casos de Ondas					
Caso	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)	Vel. Vento (m/s)	Dir. Vento (°)
1	1.75	7	ENE	6.26	48
2	3.25	9	E	8.02	96
3	1.75	11	S	3.70	50
4	4.25	14	SSW	8.70	149
5	1.75	7	NNE	4.77	3

Na Figura 42 é apresentada a comparação entre alturas significativas (Hs) entre os cenários atual e futuro na isóbata de 9 metros ao longo de toda a praia de Cacimbas representada pela grade numérica. A isóbata de 9 metros torna-se importante, pois é caracterizada como a profundidade de fechamento da praia de Cacimbas.

Da Figura 43 a Figura 47 os resultados são apresentados para o cenário atual (sem o terminal portuário, figura à esquerda), para o cenário futuro (após a implantação do terminal, figura central) e a diferença de altura significativa de onda entre os dois cenários (figura à direita).

Todos os cinco casos de ondas propagados apresentaram alguma diferença após a implantação do terminal portuário, sendo que a magnitude do impacto depende da direção do caso de onda e da sua energia.

Analisando a propagação de ondas, observa-se que nos casos 01 e 05, com Hs de 1,75 metros, períodos menores (7 segundos) e direções de ENE e NNE, respectivamente, as ondulações chegam à praia com praticamente toda energia de offshore, sendo dissipada apenas na zona de arrebentação. Já os casos 03 e 04, que possuem períodos maiores (11 e 14 segundos) começam a dissipar sua energia na isóbata de 20 metros, aproximadamente. Nota-se também que o possível paleocanal do rio Doce (vale afogado linear, sendo 2 metros mais profundo que as adjacências) gera influência nas ondulações, atenuando as alturas de onda.

De forma geral, a refração ocasionada pela alteração da feição de fundo na região da bacia de evolução e do canal de acesso altera a direção de onda, dando origem a processos de convergência (focalização de energia de onda) e divergência (espalhamento da energia de onda) dos raios de onda. Estes efeitos variam em função da direção de incidência das ondas, altura e período, no entanto, para todos os casos simulados esses efeitos alcançam a praia.

A Figura 44 exemplifica um caso de onda propagado (direção E) quase na mesma direção do canal de acesso, em que ocorre diminuição na altura de onda ao longo do canal (divergência) e aumento de altura nas áreas adjacentes (convergência).

As maiores diferenças de altura são observadas nos casos E, S e SSW, que atingem a praia com maior energia, com diferenças de até 150 cm entre o lado exposto do quebra-mar e a região protegida. Nos casos de E e SSW, a diferença da altura de onda que chega à praia alcança cerca de 100 cm menor do que no cenário atual (sem o terminal portuário). As zonas de convergência (aumento da altura de onda) que alcançam a praia são cerca de 30 cm maiores do que o cenário atual.

Nota-se que o quebra-mar constitui importante causador na redução da altura de ondas. Esta estrutura funciona

como uma zona de sombra para a propagação de ondas. Quando as ondulações são em diagonal a estrutura, uma maior área é influenciada com diferença na altura de onda. Em casos mais extremos de onda (caso 04 – altura maior que 4 m e quadrante SSW) a altura de onda do lado exposto do quebra-mar, em toda a sua extensão, apresenta aumento de 50 cm.

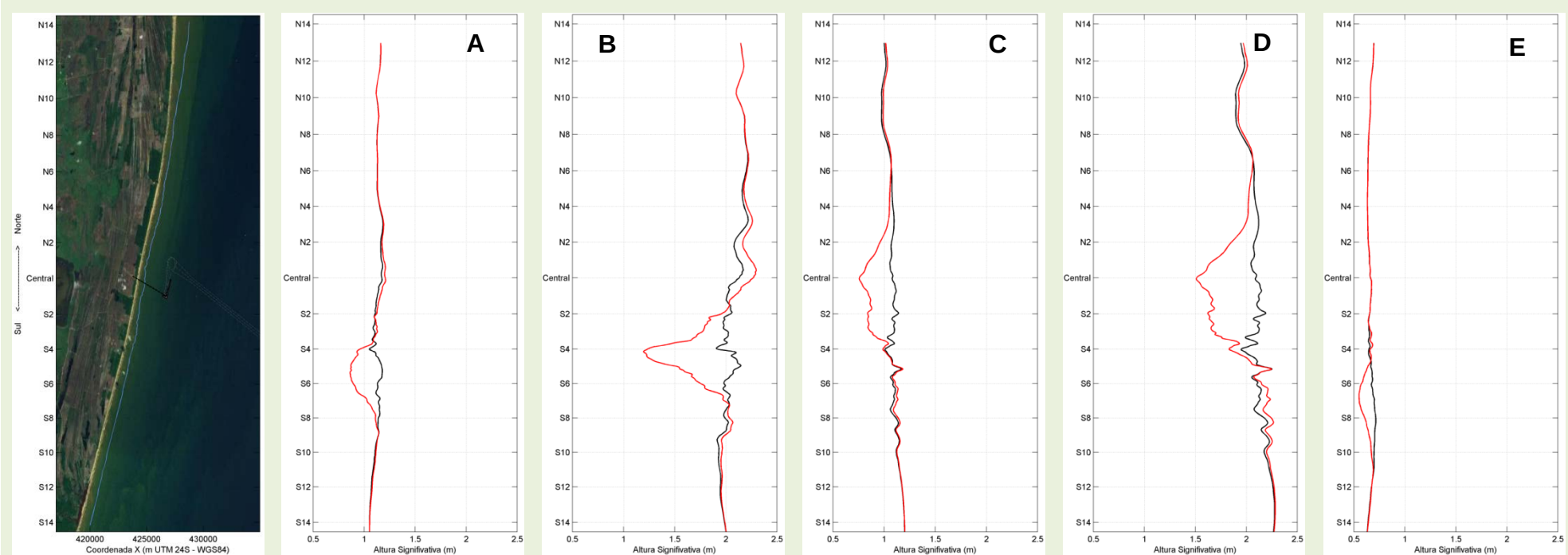


Figura 42: Diferença de altura significativa de ondas na isóbata de 9 metros ao longo da praia de Cacimbas representada pela grade numérica de ondas. (A) Caso 01, (B) Caso 02, (C) Caso 03, (D) Caso 04, (E) Caso 05. Linha sólida em preto representa o cenário atual e linha sólida em vermelho representa o cenário com o terminal. A linha em azul no quadro esquerdo representa a isóbata de 9 metros.

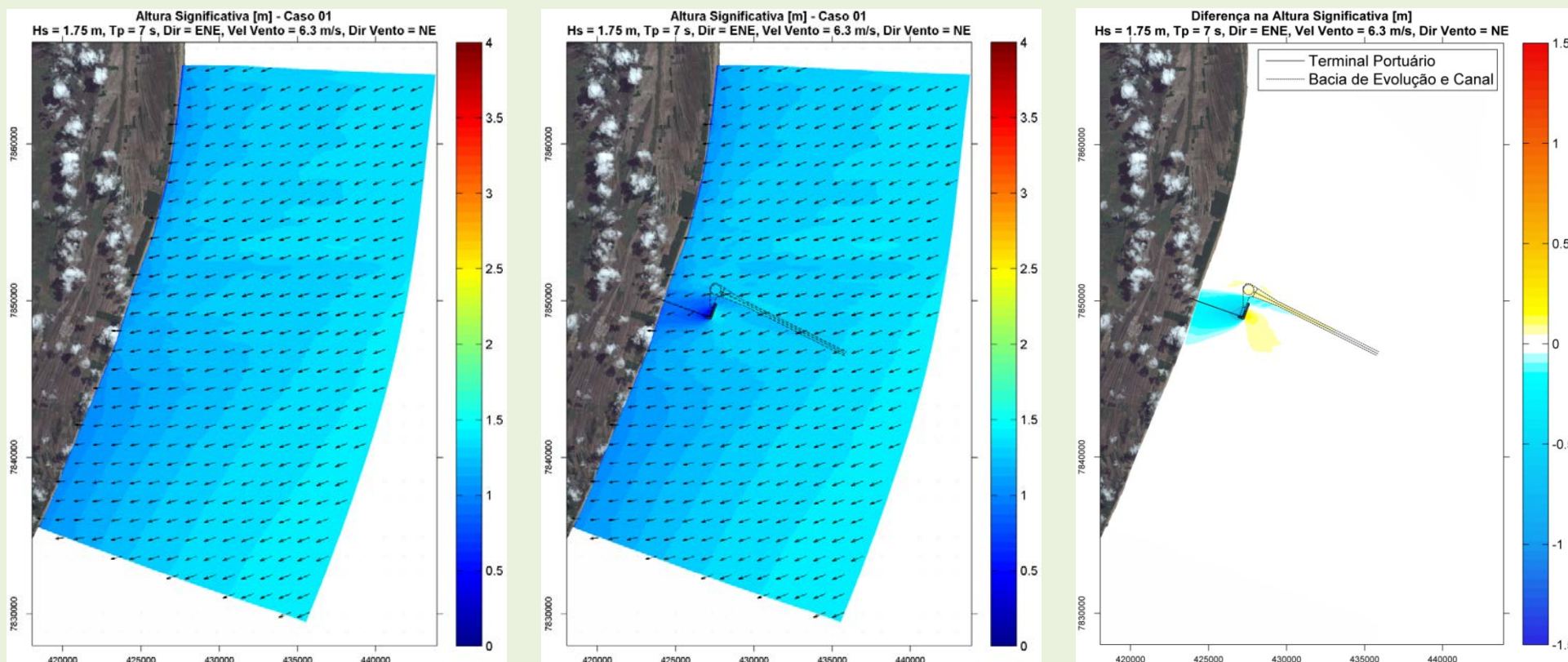


Figura 43: (Esquerda) Campo de ondas propagado para o Caso 01, no Cenário Atual. (Centro) Campo de ondas propagado para o Caso 01, no Cenário com Alternativa. (Direita) Diferença de H_s para o Caso 01 entre os dois Cenários. As cores em vermelho correspondem maiores alturas e em azul, menores. Os vetores em preto representam a direção da onda. As isolinhas na figura da direita correspondem à mesma diferença de H_s , a cada 0,5 metros.

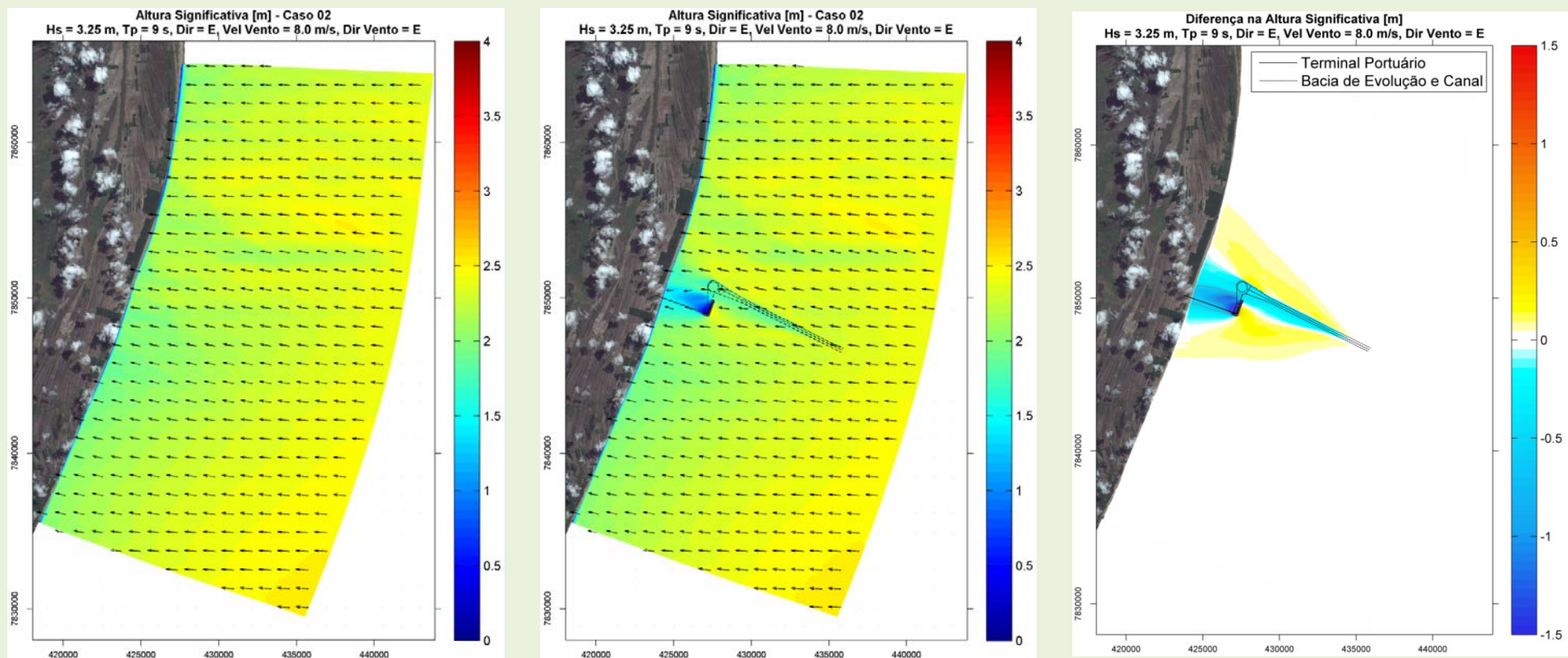


Figura 44: (Esquerda) Campo de ondas propagado para o Caso 02, no Cenário Atual. (Centro) Campo de ondas propagado para o Caso 02, no Cenário com Alternativa. (Direita) Diferença de Hs para o Caso 02 entre os dois Cenários. As cores em vermelho correspondem maiores alturas e em azul, menores. Os vetores em preto representam a direção da onda. As isolinhas na figura da direita correspondem à mesma diferença de Hs, a cada 0,5 metros.

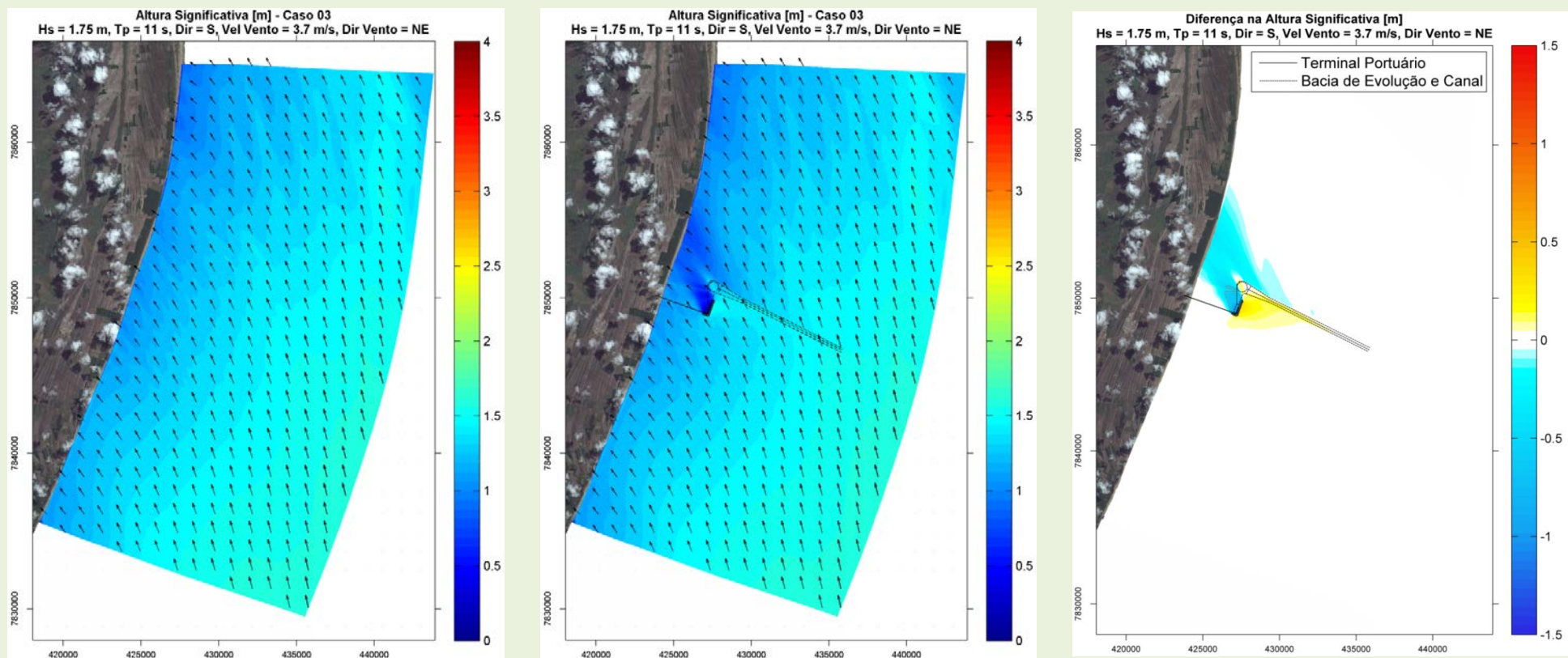


Figura 45: (Esquerda) Campo de ondas propagado para o Caso 03, no Cenário Atual. (Centro) Campo de ondas propagado para o Caso 03, no Cenário com Alternativa. (Direita) Diferença de Hs para o Caso 03 entre os dois Cenários. As cores em vermelho correspondem maiores alturas e em azul, menores. Os vetores em preto representam a direção da onda. As isolinhas na figura da direita correspondem à mesma diferença de Hs, a cada 0,5 metros.

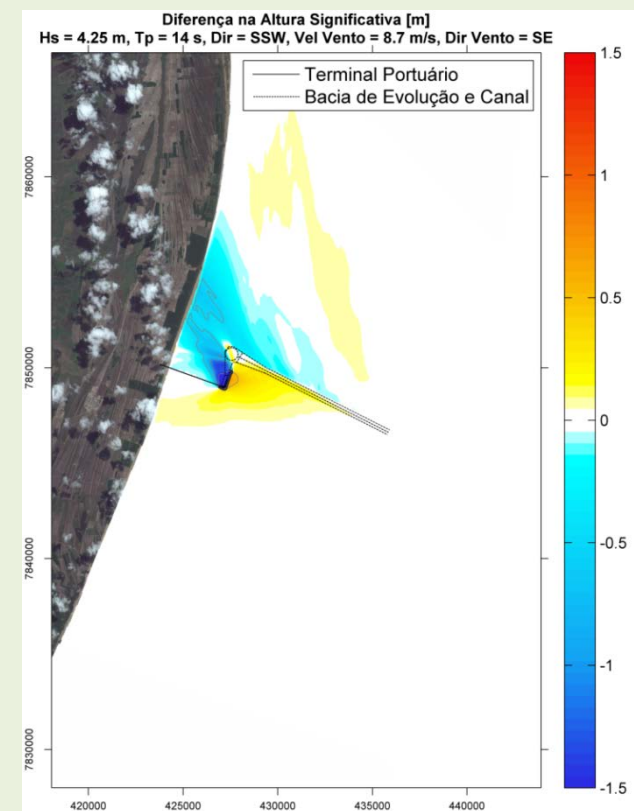
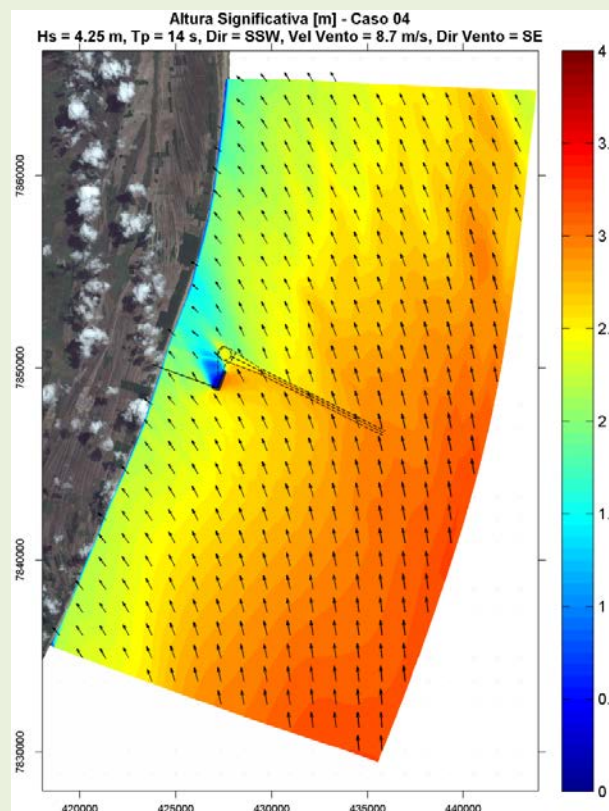
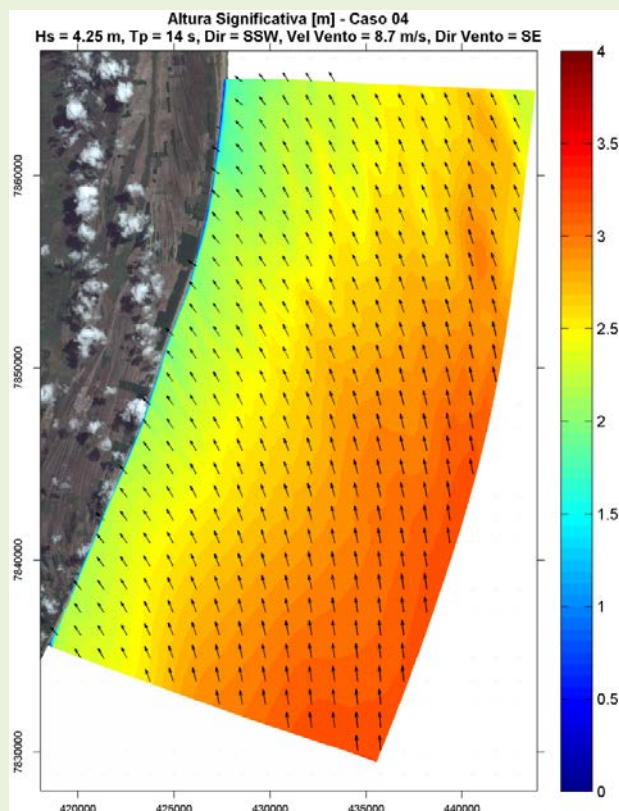


Figura 46: (Esquerda) Campo de ondas propagado para o Caso 04, no Cenário Atual. (Centro) Campo de ondas propagado para o Caso 04, no Cenário com Alternativa. (Direita) Diferença de Hs para o Caso 04 entre os dois Cenários. As cores em vermelho correspondem maiores alturas e em azul, menores. Os vetores em preto representam a direção da onda. As isolinhas na figura da direita correspondem à mesma diferença de Hs, a cada 0,5 metros.

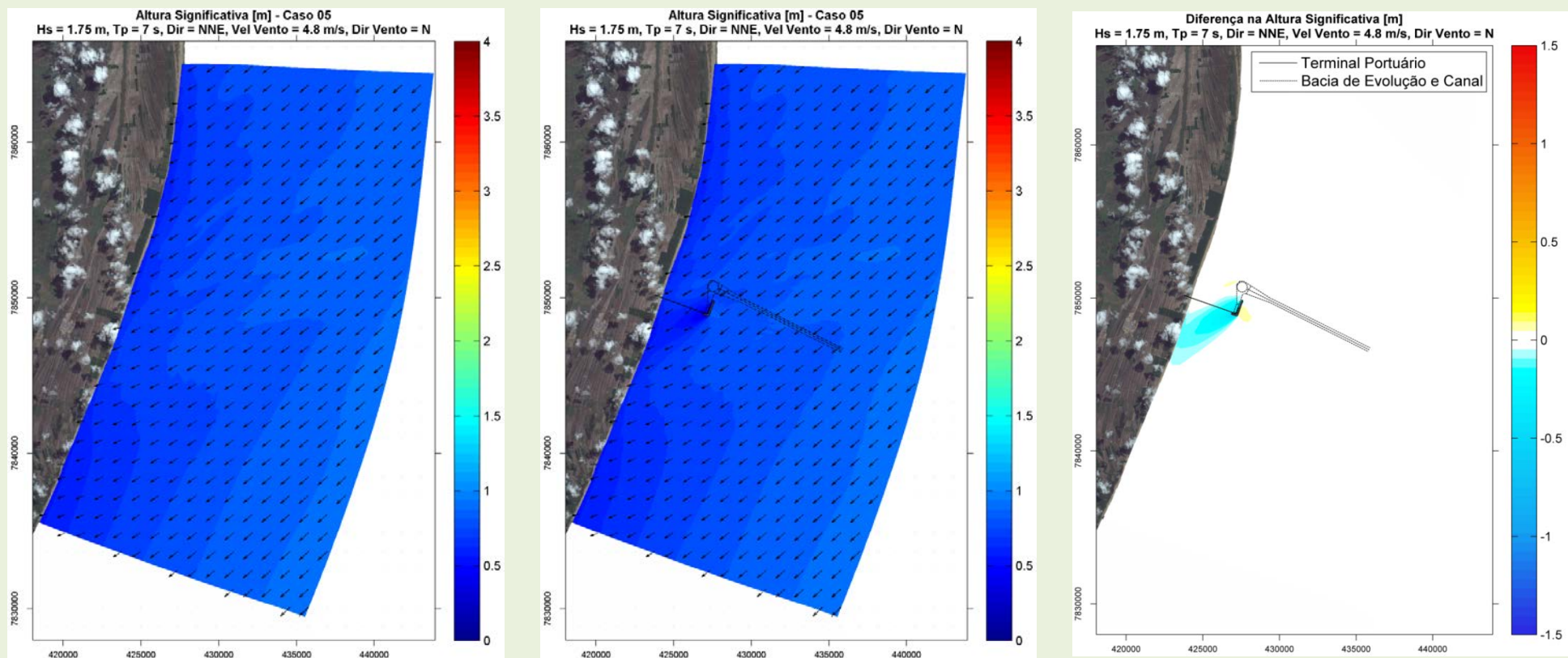


Figura 47: (Esquerda) Campo de ondas propagado para o Caso 05, no Cenário Atual. (Centro) Campo de ondas propagado para o Caso 05, no Cenário com Alternativa. (Direita) Diferença de H_s para o Caso 05 entre os dois Cenários. As cores em vermelho correspondem maiores alturas e em azul, menores. Os vetores em preto representam a direção da onda. As isolinhas na figura da direita correspondem à mesma diferença de H_s , a cada 0,5 metros.

4.2.2 Circulação Hidrodinâmica

Com os mesmos cinco casos de ondas propagados para avaliar o efeito da implantação do terminal portuário nas ondas, foram simulados ciclos completos de maré, em condições de sizígia e quadratura, para avaliar o impacto do terminal portuário na circulação hidrodinâmica em torno da região de estudo.

Da Figura 49 a Figura 53 são apresentadas as diferenças na magnitude das correntes para os casos de onda simulados, em condição de quadratura (esquerda) e sizígia (direita). A diferença da magnitude é calculada pelo campo de correntes do cenário com o terminal portuário implantado menos o campo de correntes com o cenário atual.

O ambiente em questão apresenta elevadas velocidades de corrente (da ordem de 1 m/s) paralela à linha de costa. Em condições de maré de sizígia aliadas a um vento e ondas com direção do mesmo quadrante, esta magnitude pode ser amplificada chegando a valores altos (1,3 m/s), conforme apresentado na Figura 48, que representa as velocidades máximas em condições de quadratura (A) e sizígia (B) para o caso 03, um caso bastante frequente de ondas do quadrante sul, com altura de 1,75 m e período de 11 segundos.

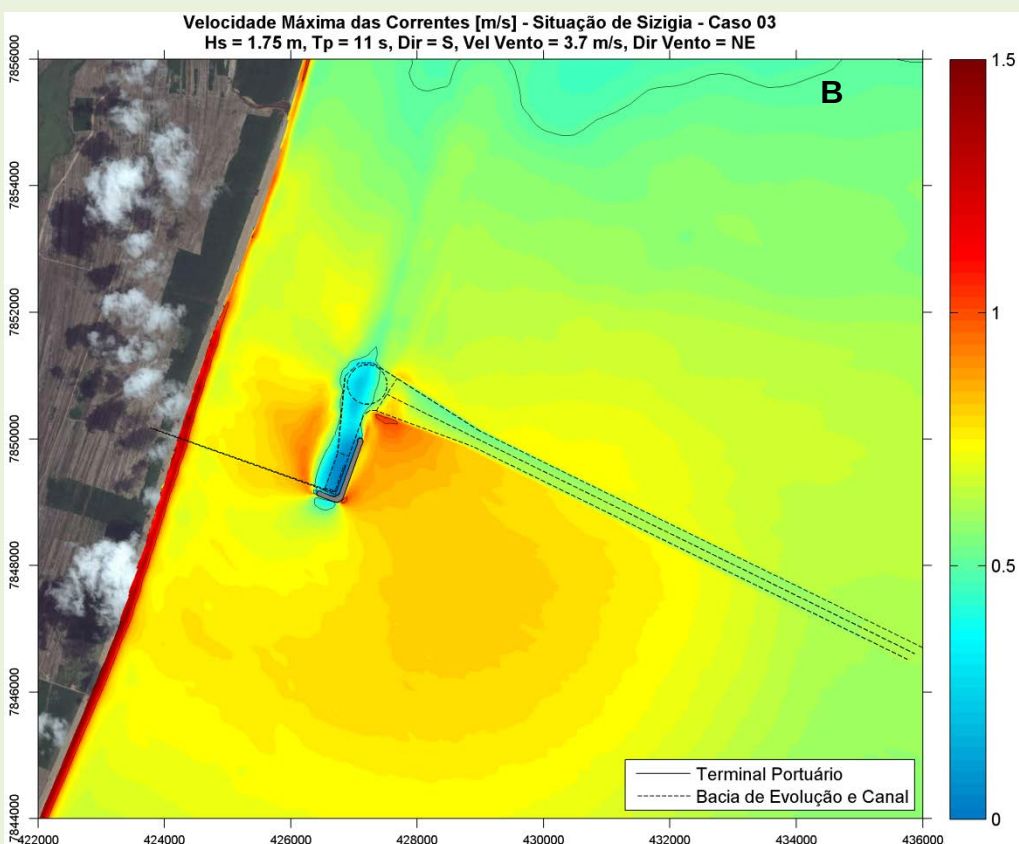
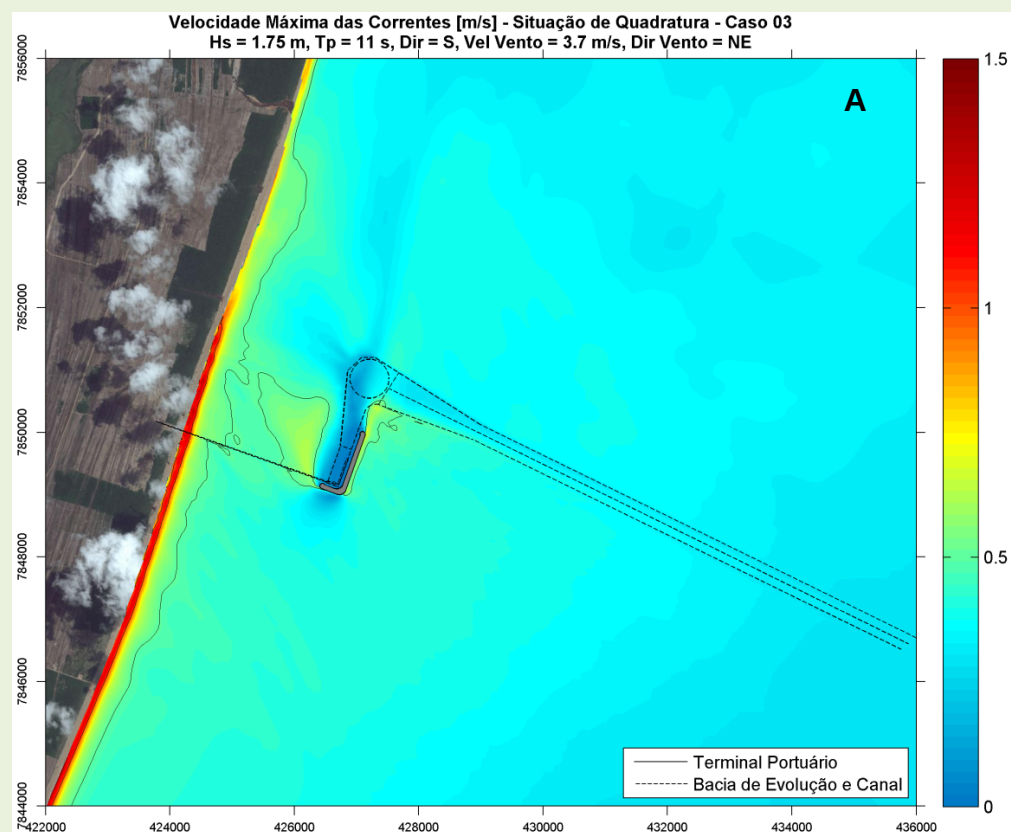
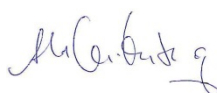


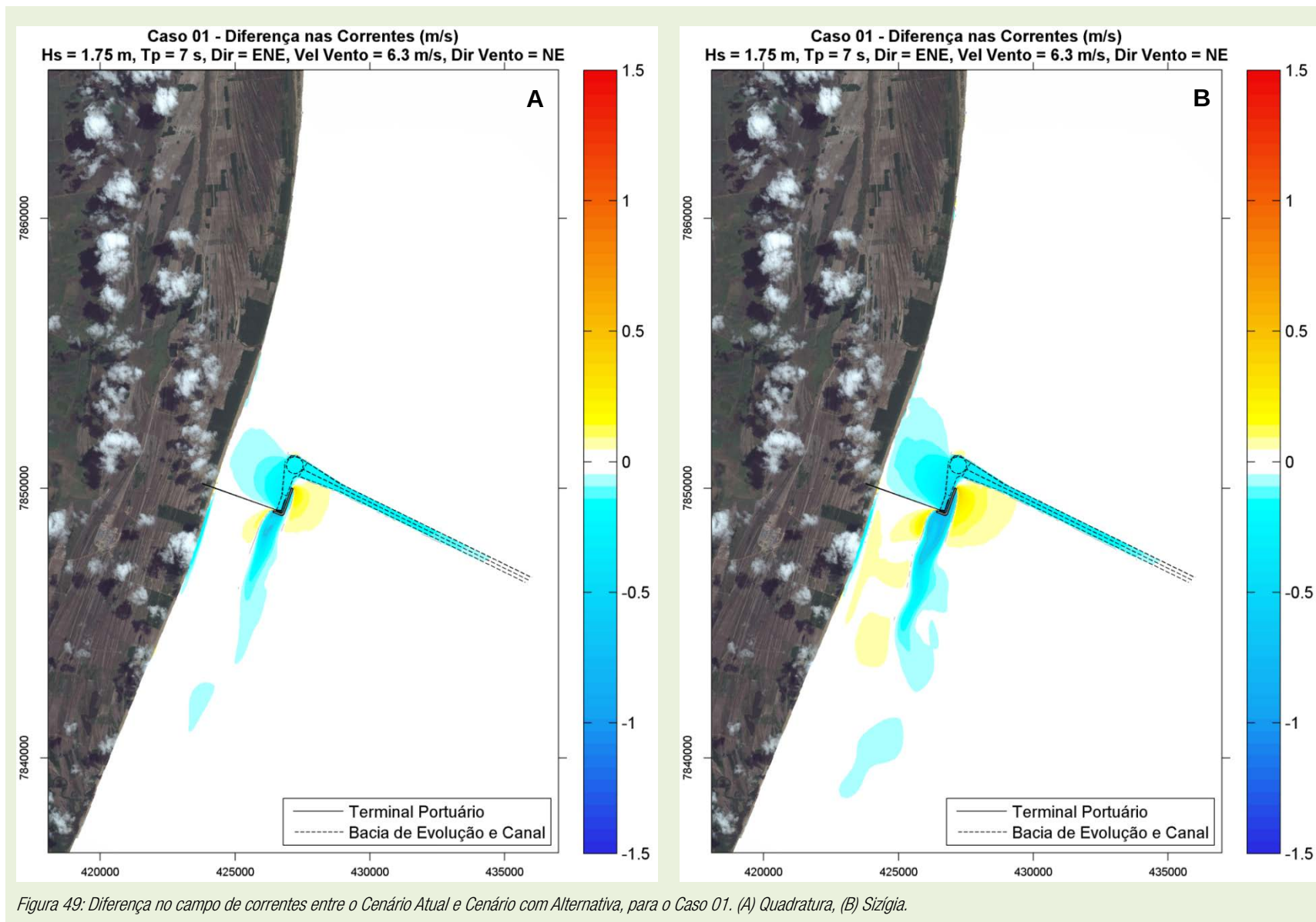
Figura 48: Velocidades máximas de corrente obtidas para o Caso 03 em condições de quadratura (A), e sизigia (B). O caso 03 foi escolhido por representar um caso de onda frequente na localidade. As isolinhas representam mesma magnitude de corrente, a cada 0,5 m/s.

De maneira geral, todos os casos apresentam maior diferença na magnitude para condições de sizígia, podendo alcançar uma redução na magnitude das correntes de aproximadamente 1 m/s na zona de sombra do quebra-mar, e atingir cerca de 1,2 m/s a mais nas pontas do quebra-mar e região adjacente, sendo estas regiões caracterizadas pela intensificação da corrente devido à transferência de parte da quantidade de movimento da região que sofre influência do quebra-mar (obstáculo ao fluxo) para as regiões adjacentes, desabrigadas do obstáculo.

Todos os casos apresentaram diferença na magnitude da corrente mínima de 0,5 m/s. Os casos com maiores diferenças foram o caso 01, com ondas de ENE e vento NE em condição de sizígia, o caso 02 com ondas e ventos de E em condição de sizígia e o caso 04 com ondas de SSW e vento de SE, tanto em sizígia quanto quadratura.

Além do impacto pelo quebra-mar, todos os casos mostrados apresentaram diferença na magnitude da corrente junto à costa, de cerca 0,5 m/s, ocasionado pela diferença nas alturas de ondas geradas pelo quebra-mar. O canal de navegação também influencia a velocidade das correntes em cerca de 0,5 m/s, por ser mais profundo.





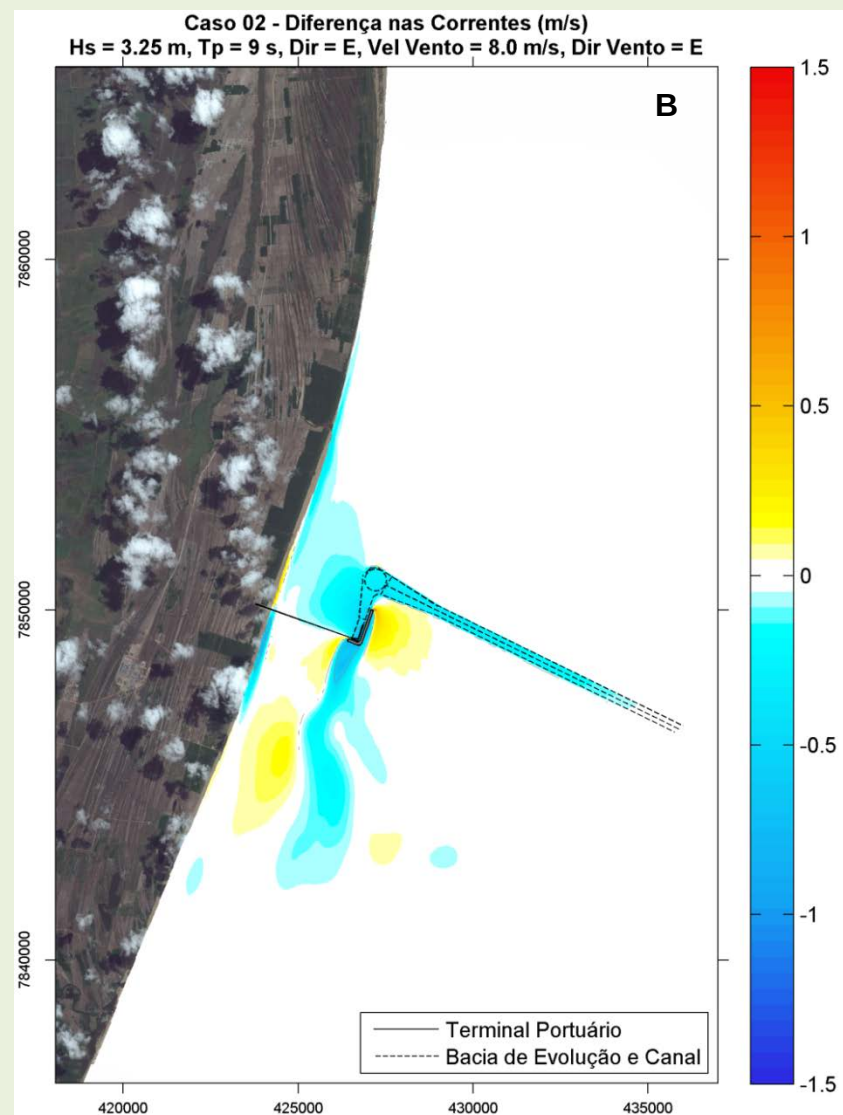
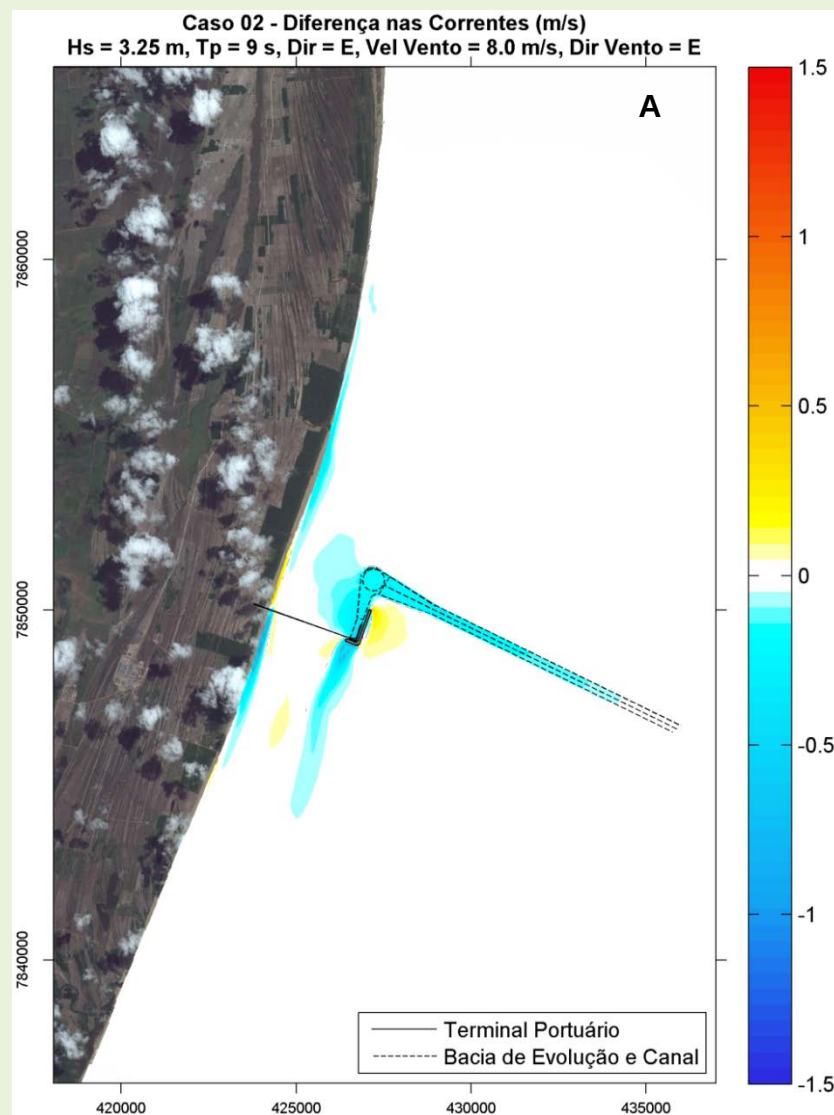


Figura 50: Diferença no campo de correntes entre o Cenário Atual e Cenário com Alternativa, para o Caso 02. (A) Quadratura, (B) Sízigia.

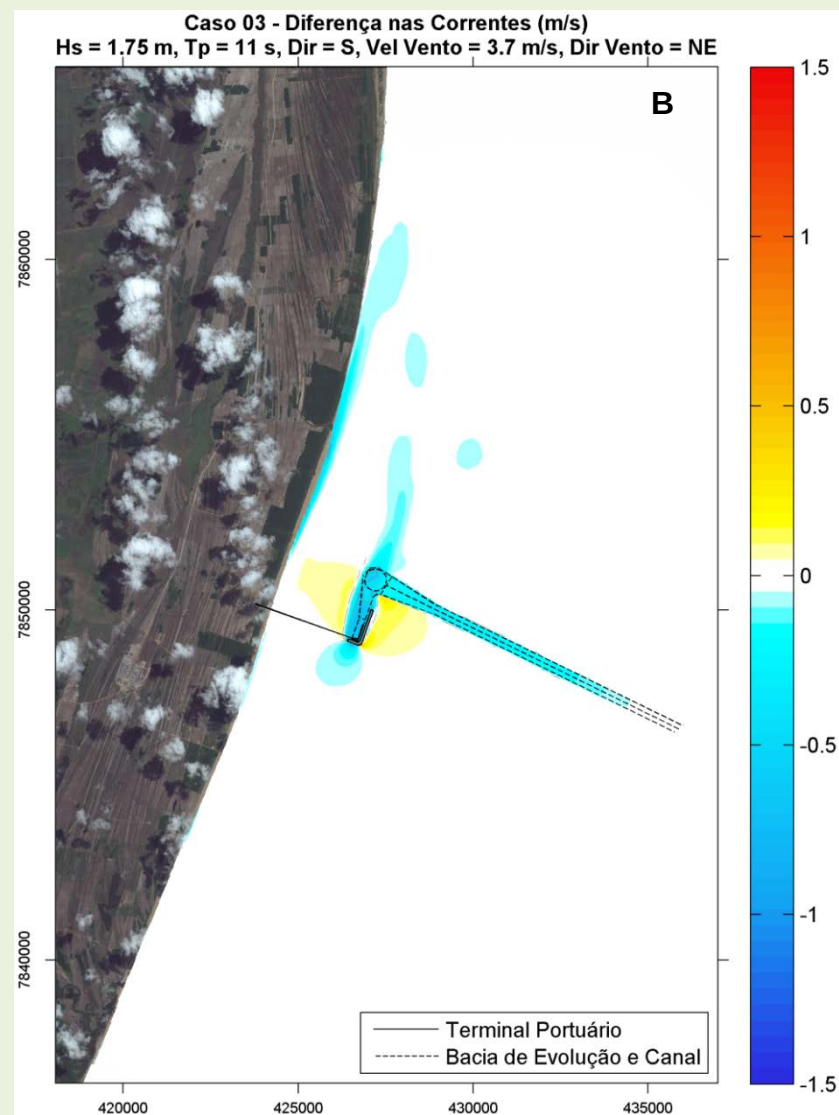
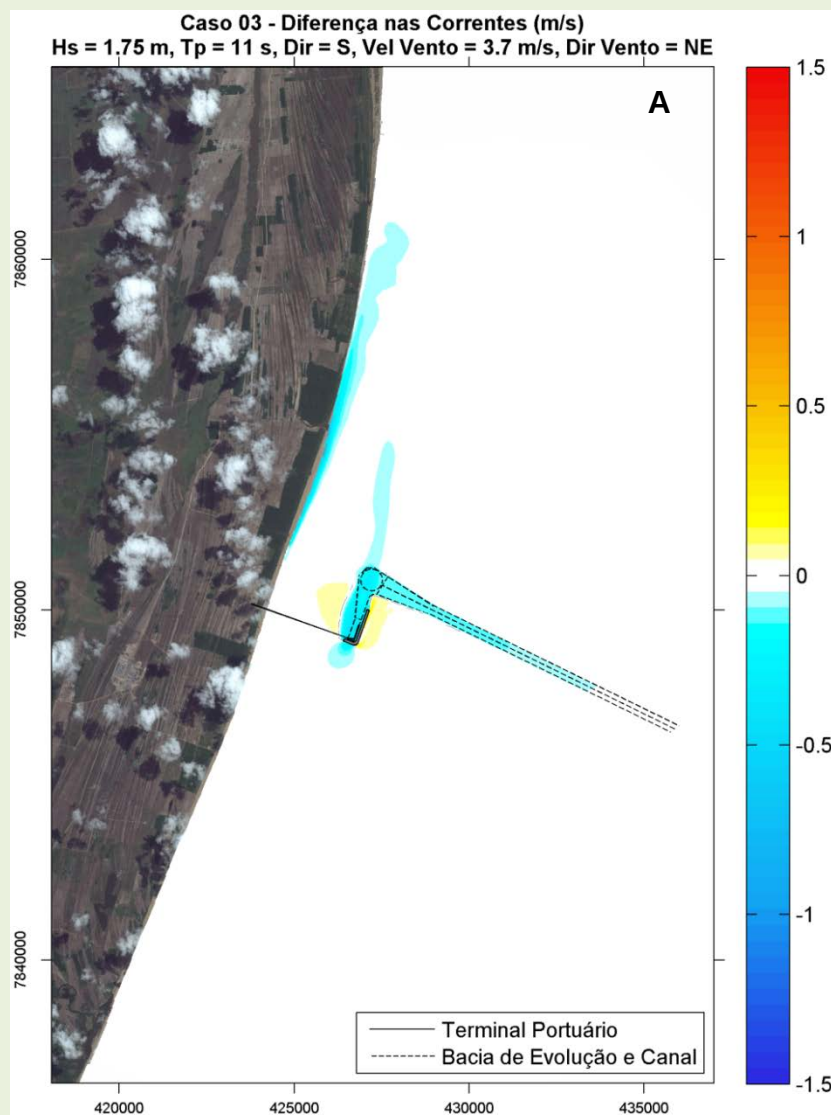
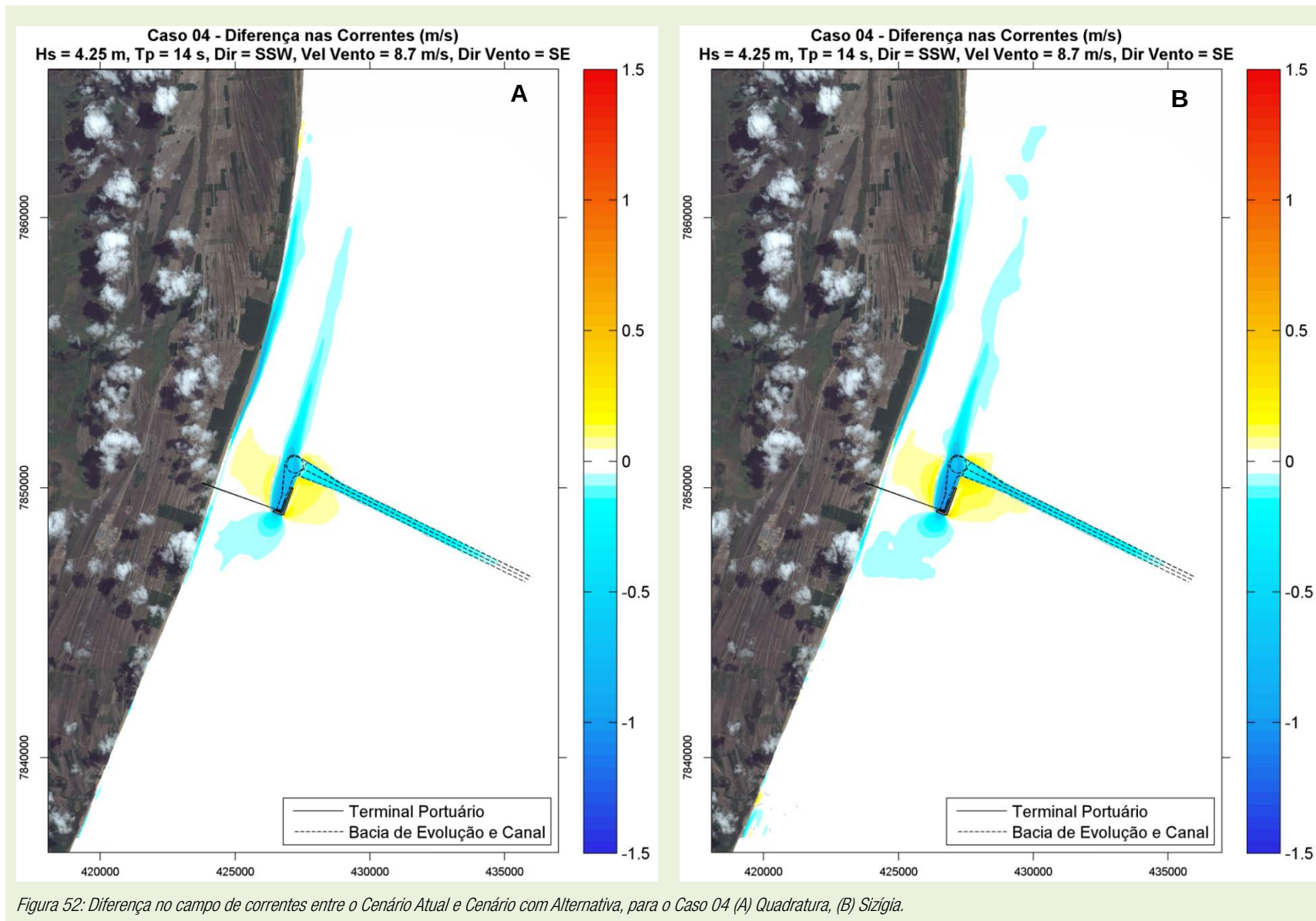


Figura 51: Diferença no campo de correntes entre o Cenário Atual e Cenário com Alternativa, para o Caso 03 (A) Quadratura, (B) Sízigia.



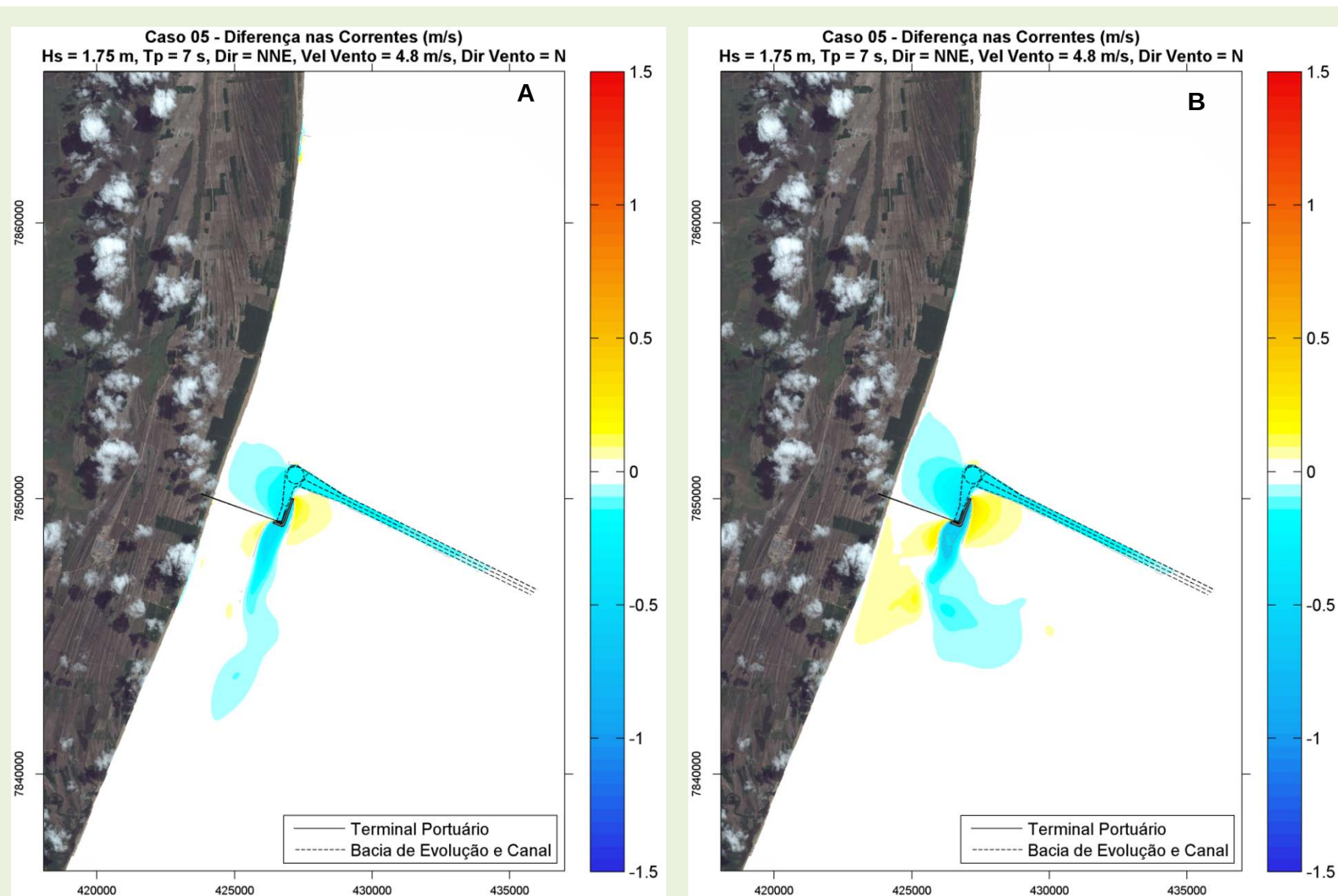


Figura 53: Diferença no campo de correntes entre o Cenário Atual e Cenário com Alternativa, para o Caso 05 (A) Quadratura, (B) Sízigia.

Da Figura 54 até a Figura 56 são mostrados os campos de correntes em situação de sizígia para cada um dos 5 casos, no cenário com o terminal portuário implantado. Observa-se principalmente o efeito na hidrodinâmica gerado pelo canal de navegação, bacia de evolução e quebra-mar. Verifica-se a intensificação da velocidade da corrente nas adjacências do quebra-mar, e atenuação no canal de navegação e bacia de evolução (regiões mais profundas). Além disso, verifica-se a ocorrência de vórtices na região abrigada pelo quebra-mar. Esta região abrigada muda de localidade em função do regime de maré, ondulações e vento atuante, sendo que ora está no lado norte da estrutura e ora no lado sul.

Chama-se atenção neste item do relatório para o campo de correntes que estará atuando sobre o terminal portuário Manabi após sua implantação. A forma do layout do terminal proporciona correntes transversais ao canal de navegação da ordem de 1 a 2 nós em regime de ondulações e ventos muito frequentes para a região de estudo. Para ilustrar isto, a Figura 55A apresenta o caso 03, com ondulação do quadrante sul (19 % do tempo em 30 anos), com altura de 1,75 metros (40 % do tempo em 30 anos) e período de 11 segundos (24% do tempo em 30 anos) com vento nordeste fraco. Este caso de onda gera um vórtice com aproximadamente 700 metros de comprimento e com velocidade de corrente de 1 m/s (2 nós) no canal de navegação e 0,5 m/s (1 nó) de corrente na bacia de evolução, ambas as correntes transversais ao canal, o que pode ocasionar perigos à navegação.

Na Figura 55B, onde é simulado um caso extremo com ondulação de SSW (21,6 % do tempo em 30 anos), altura de 4,25 m (0,5 % do tempo em 30 anos) e período de 14 segundos (14,4 % do tempo em 30 anos), a corrente transversal ao canal pode alcançar 1,5 m/s (3 nós) em situação de sizígia. Nos casos com ondulações de NE e E, casos 01 e 02, chama-se atenção para as velocidades de correntes na região dos berços de atracação, onde alcançam cerca de 1 nó na mesma direção da atracação.

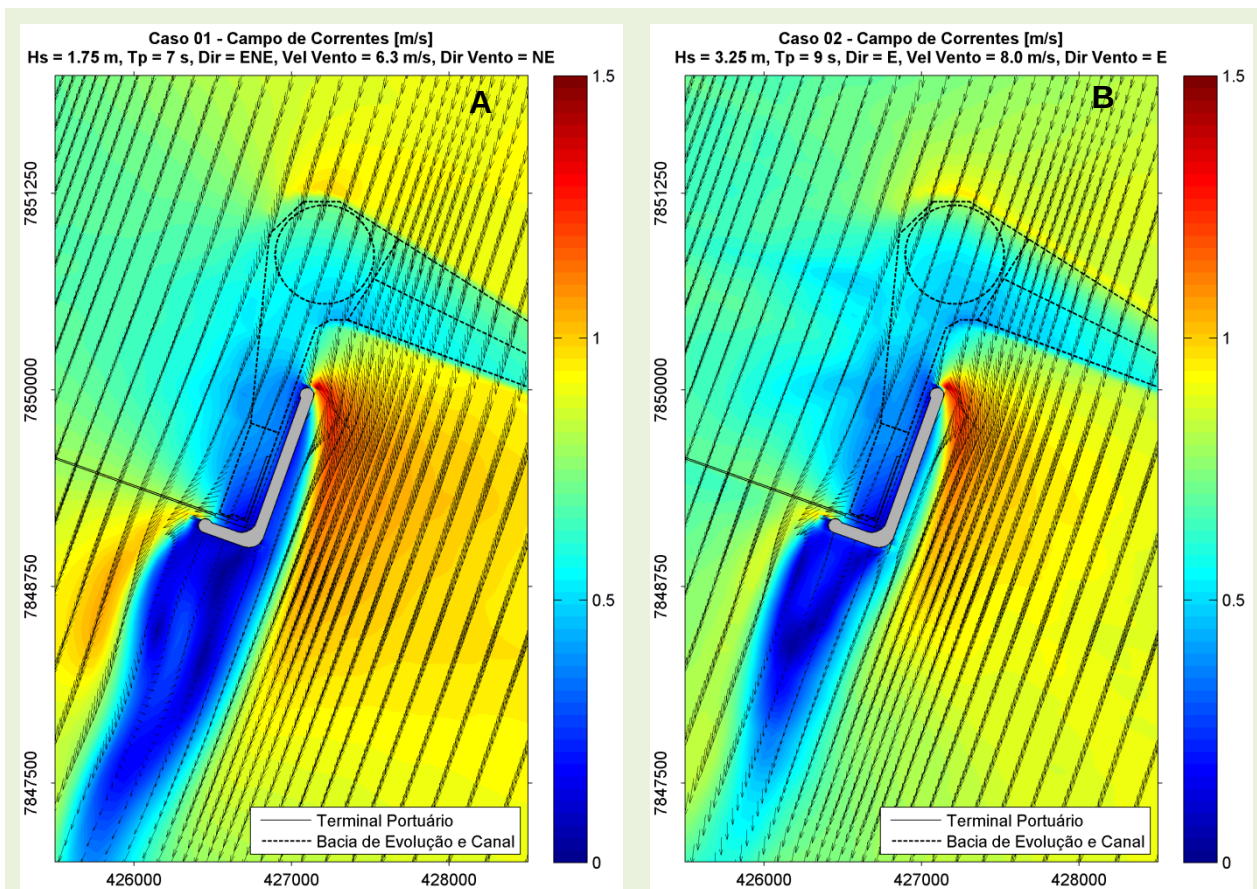


Figura 54: Campo de correntes em sizígia. (A) Caso 01, (B) Caso 02.

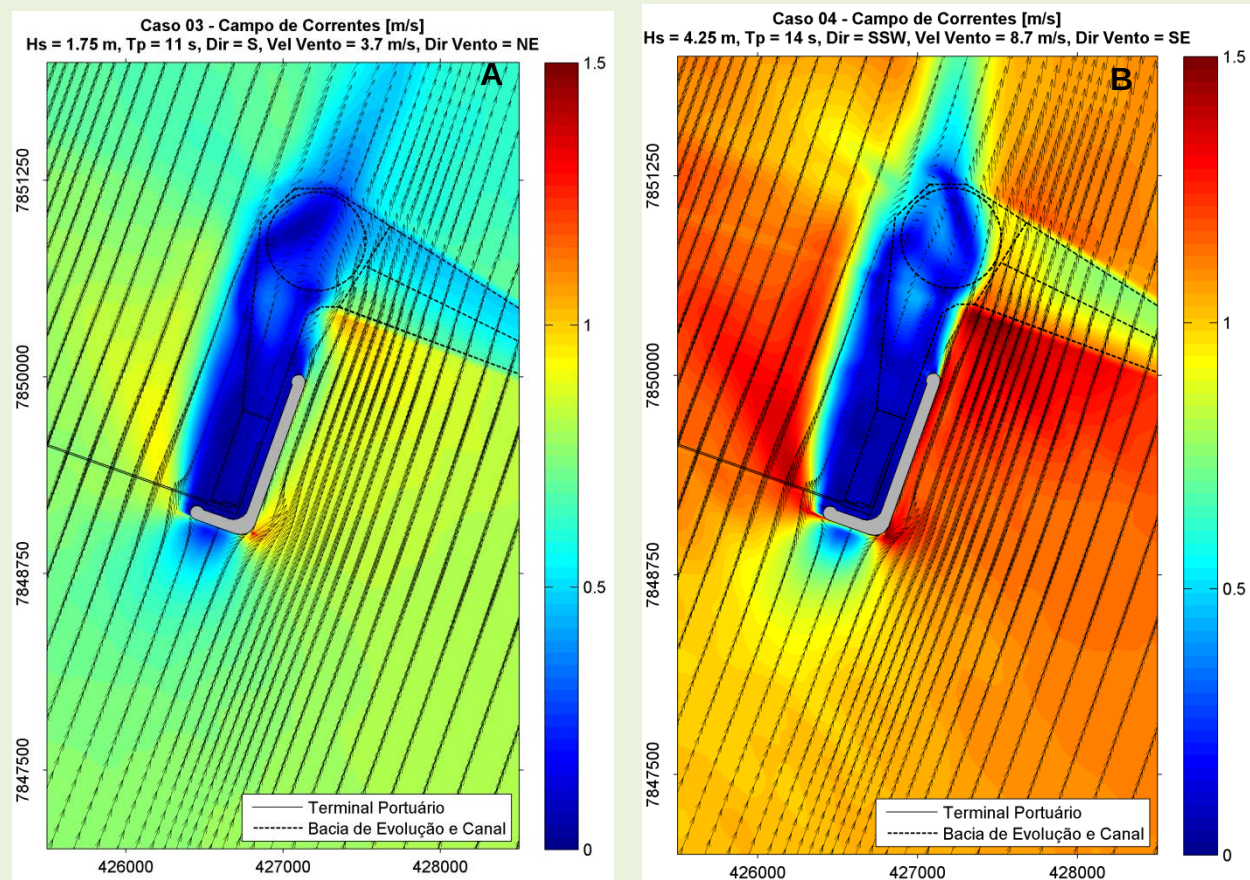
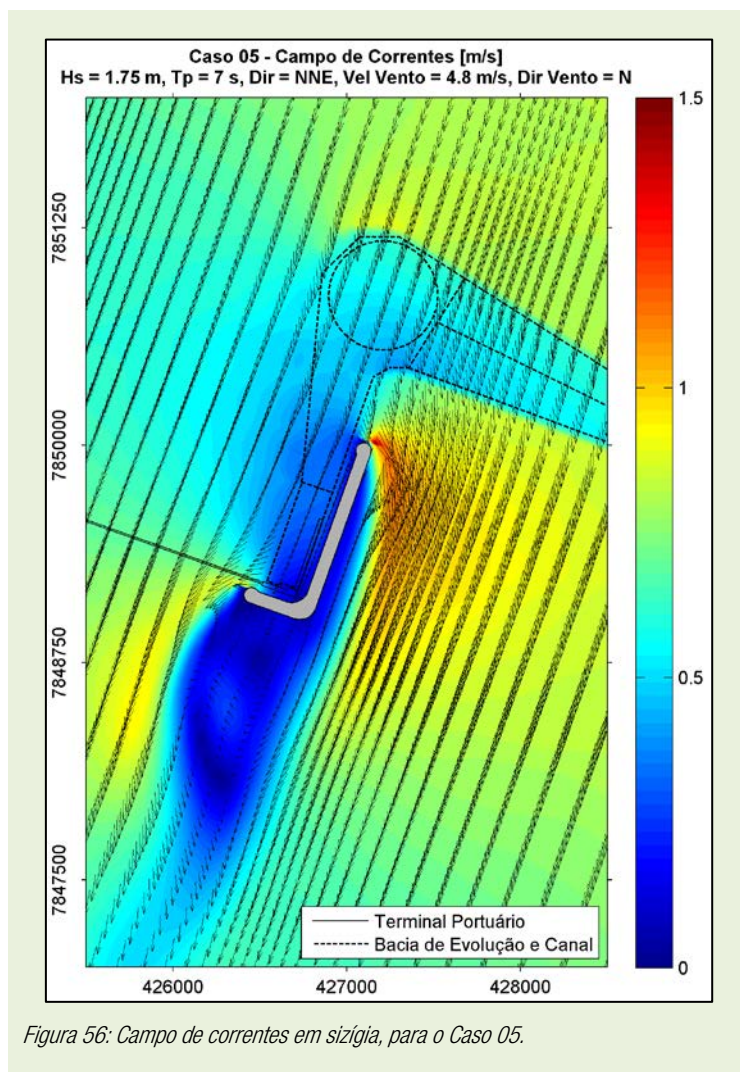


Figura 55: Campo de correntes em sizígia. (A) Caso 03, (B) Caso 04.



4.3 AVALIAÇÃO DO IMPACTO MORFODINÂMICO

4.3.1 Transporte de Sedimentos

Para verificar os efeitos da implantação do terminal portuário Manabi no transporte de sedimentos, foram analisados os resultados de transporte residual de sedimentos obtidos de simulações numéricas morfodinâmicas realizadas para os mesmo cinco casos de ondas apresentados no item 4.2.1. Os resultados são apresentados para o cenário atual, cenário com a implantação do terminal e diferença no transporte entre os dois cenários. Apenas o caso 05 não é apresentado, pois este não apresentou diferença no transporte de sedimentos com ou sem o terminal.

Observa-se que o transporte de sedimentos predominante na localidade é situado na zona de surfe da praia de Cacimbas (Figura 57 e Figura 58). O transporte resultante variou de acordo com o caso de onda simulado, bem como a orientação, para sul ou para norte. Quanto mais energético o caso de onda, maiores as taxas de transporte. Os casos mais energéticos, representados pelas ondulações dos quadrantes leste e sul (casos 02 e 03) apresentaram valores 2 a 3 m³/m/h na zona de surfe. É possível observar o efeito do quebra-mar sobre o transporte de sedimentos nos casos de ondas oblíquos à estrutura. A região que fica sombreada pela estrutura tem diminuição no valor de transporte, o que refletirá em um maior acúmulo de sedimentos. Este efeito pode ser notado no caso 01 (Figura 57 – quadro superior) e no caso 03 (Figura 58 – quadro superior). O caso 04 (Figura 58 – quadro inferior), caracterizado como evento extremo ou tempestades, apresentou valor de transporte de sedimentos de até 16 m³/m/h (escala fixada em 3 m³/m/h para comparação) na zona de surfe. Com a presença do quebra-mar, ocorreu uma diminuição no transporte de 2 m³/m/h na região sombreada pela estrutura. Este mesmo caso gerou transporte de até 0,5 m³/m/h na base e região adjacente do quebra-mar, mesmo estando em grandes profundidades (aproximadamente 11 metros).

É possível notar nos casos 02 e 03, que o transporte de sedimentos acompanha o padrão de convergência de divergência das ondas (causado pelo canal de navegação) e a zona de sombra (gerada pelo quebra-mar), com um transporte positivo de sedimentos para a zona de sombra e um transporte negativo de sedimentos nos dois lados adjacentes. No caso 04 (extremo), nota-se a grande zona de sombra gerada pelo quebra-mar causando uma redução no transporte de sedimentos, gerado pela diminuição das alturas de ondas.

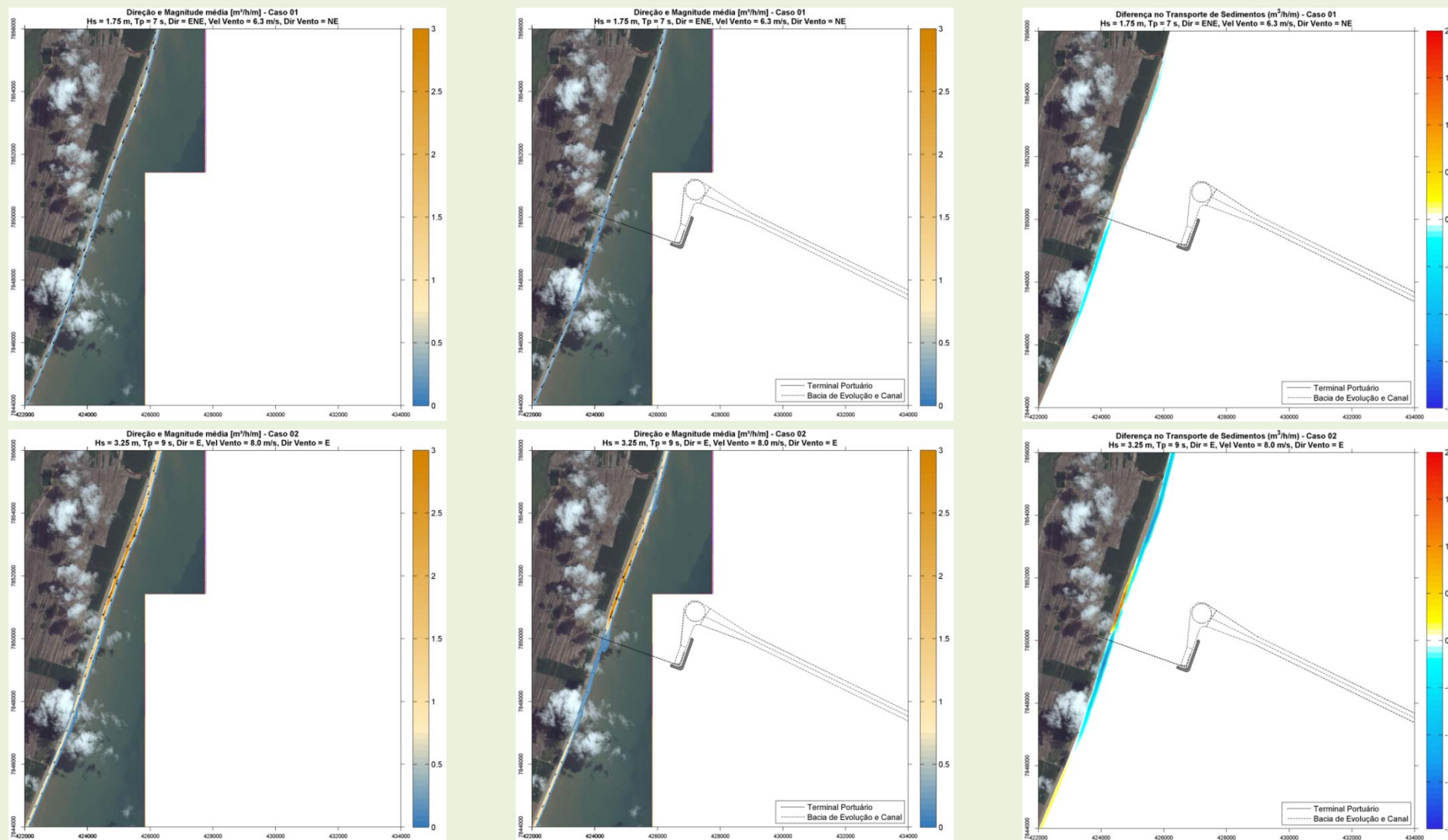


Figura 57: Transporte residual de sedimentos para o Cenário Atual (Esquerda), Cenário com Alternativa (Centro) e diferença no transporte residual entre os dois cenários (Direita). Quadro superior representa o Caso 01 e quadra inferior o Caso 02. Vetores indicam a direção do transporte e cores a magnitude.

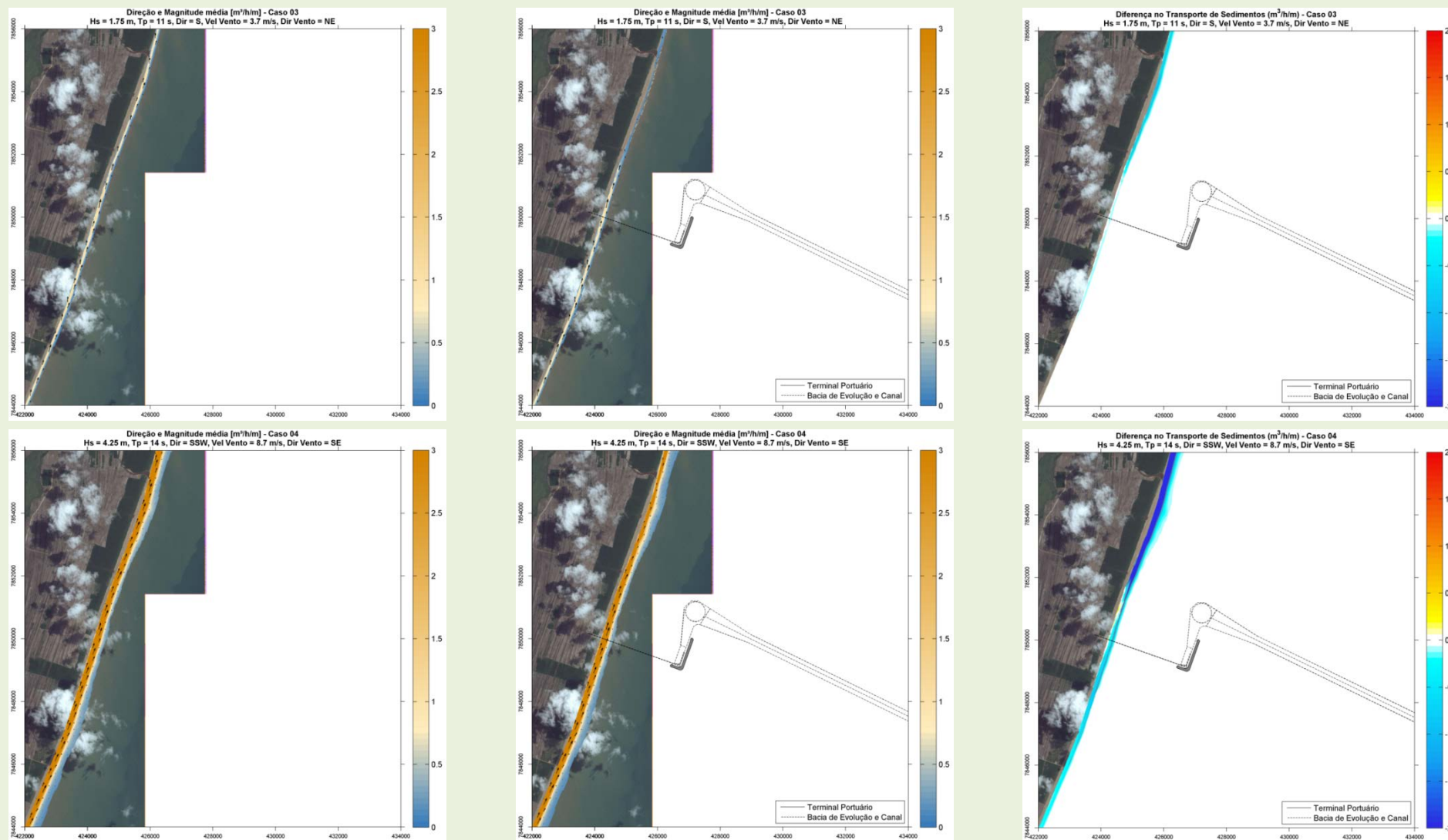


Figura 58: Transporte residual de sedimentos para o Cenário Atual (Esquerda), Cenário com Alternativa (Centro) e diferença no transporte residual entre os dois cenários (Direita). Quadro superior representa o Caso 03 e quadra inferior o Caso 04. Vetores indicam a direção do transporte e cores a magnitude.

4.3.2 Morfologia

A seguir são apresentados os resultados do modelo morfológico para simulações nos períodos de 1 e 5 anos. Primeiramente é apresentada a evolução em cada um dos cenários e em seguida a diferença da evolução morfológica após a implantação do terminal portuário Manabi.

Os valores de variação volumétrica foram calculados na zona de surfe até a profundidade de fechamento encontrada pelo modelo, aproximadamente 9 metros. O valor de profundidade de fechamento calculado pelo modelo numérico é considerado satisfatório por ser um valor intermediário entre os valores de profundidade de fechamento calculados pelas formulas clássicas de Hallermeier (1981) e Birkermeier (1985), que são 10,2 m e 7,8 m, respectivamente.

Os resultados de morfologia são apresentados de duas formas: através da evolução morfológica para cada cenário de forma independente, indicando a alteração batimétrica após o período simulado (01 ou 05 anos), e através da diferença na evolução morfológica ou evolução morfológica relativa entre os dois cenários, indicando as diferenças entre as evoluções morfológicas entre cenários, ou seja, a diferença batimétrica entre como seria com a intervenção e de como seria sem nenhuma intervenção.

Desta forma, uma evolução morfológica relativa negativa pode representar uma acresção de menor magnitude do cenário com alternativa em relação ao cenário atual, uma erosão do cenário com alternativa sem haver alteração ou havendo acresção de menor magnitude do cenário atual, ou até mesmo uma erosão mais pronunciada do cenário com alternativa em relação à erosão do cenário atual. De forma equivalente, uma evolução morfológica relativa positiva pode representar uma acresção de maior magnitude do cenário com alternativa em relação ao cenário atual, uma acresção do cenário com alternativa sem haver alteração ou havendo erosão de menor magnitude do cenário atual, ou até mesmo uma erosão menos pronunciada do cenário com alternativa em relação à erosão do cenário atual. Evolução morfológica relativa nula pode representar que não houve alteração em nenhum dos cenários, ocorrência de erosão nos dois cenários com mesma magnitude, ou ocorrência de acresção nos dois cenários de mesma magnitude.

AValiação de Impacto Após 01 Ano de Simulação

Os resultados da evolução morfológica após 01 (um) ano com o cenário atual e com o cenário com alternativa são apresentados na Figura 61. Na Figura 62 é apresentada a diferença na evolução morfológica entre os dois cenários.

Observa-se que a região que sofrerá maior impacto pela implantação do empreendimento serão as porções aéreas e subaéreas da praia de Cacimbas e, que pode ser dividida em 3 setores mais representativos (sul, central e norte), conforme ilustrado na Figura 63.

No setor norte, o cenário com alternativa apresenta padrão erosivo e o cenário atual apresenta padrão de leve acresção, e conseqüentemente, diferença na evolução morfológica (evolução morfológica relativa) negativa. Esta diferença na evolução morfológica negativa é decorrente das alterações no padrão de refração das ondas do quadrante sul ocasionado pelo canal, bacia de evolução e quebramar, com interrupção ou até inversão do transporte residual em uma região mais protegida pela estrutura e logo à norte na região erosiva, uma nova intensificação no gradiente de transporte de sul para norte.

No setor central, tanto o cenário atual quanto o cenário com alternativa apresentam padrão acrescivo, porém este último de maior magnitude, decorrendo em uma diferença na evolução morfológica positiva. Neste setor ocorre uma faixa de aproximadamente 2 km com acresção de sedimentos (cerca de 2 metros de altura), relacionada a uma variação relativa positiva do volume de $86 \text{ m}^3/\text{m}$ em média, indicando uma maior acresção do cenário com alternativa em relação à acresção do cenário atual, e, em contrapartida, o trecho ao norte com 6 km de extensão apresentou diferença na evolução morfológica negativa (aprox. 2 metros) associada a uma variação relativa negativa do volume de $140 \text{ m}^3/\text{m}$ em média, relacionada a uma região com baixa variação morfológica no cenário com alternativa e padrão acrescivo no cenário atual.

No setor sul, tanto o cenário atual quanto o cenário com alternativa apresentam padrão acrescivo, porém este último de menor magnitude, decorrendo uma diferença na evolução morfológica negativa. Neste setor ocorre uma faixa de cerca de 5 km com variação relativa do volume negativa, de baixa magnitude, $14 \text{ m}^3/\text{m}$ em média, relacionada a uma região do cenário com alternativa com acresção sensivelmente menor que a do cenário atual. Estes valores podem ser observados na Figura 62.

Apesar do maior impacto na morfologia de fundo ser causada na praia, as estruturas criadas pelo empreendimento também estão sujeitas a variações batimétricas. Após 01 (um) ano de simulação observa-se uma leve erosão no topo do talude no lado norte do canal de navegação e uma deposição da mesma magnitude de volume na base do talude do lado sul, até a profundidade de 19 metros. Esta alteração da morfologia do canal é causada principalmente pela corrente de maré, transversal ao canal. Pelo mesmo motivo, a base do quebra-mar também se mostrou sujeita a variação batimétrica, apresentado erosão nas três pontas da estrutura, devido à intensificação da corrente local (item 4.2.2).

Os resultados do transporte de sedimentos resultante após 01 (um) ano de simulação são apresentados na Figura 59.

O transporte resultante de sedimentos no cenário com o terminal apresentou direção sul para norte da região sul da grade numérica até o setor central (setor de acresção) com valor em torno de $3000 \text{ m}^3/\text{m}/\text{ano}$. No setor norte, pelo efeito do quebra-mar e canal de navegação, é criada uma zona de reversão do transporte de sedimentos que migram da direção norte para sul e sedimentam no setor central. Pelo fator de ocorrer esta reversão, o valor de transporte resultante ficou baixo, em torno de $500 \text{ m}^3/\text{m}/\text{ano}$. Após esta região de inversão o transporte residual volta a ser de sul para norte também com valores de $3000 \text{ m}^3/\text{m}$ de sedimentos. No cenário atual, o transporte resultante é na direção sul para norte ao longo de toda a grade numérica, corroborando com o estudo de Bittencourt *et. al.* (2007), que avaliaram o transporte de sedimentos da região do delta do rio Doce com modelo numérico de clima de ondas. A taxa de transporte média no cenário atual apresentou valor igual a $3000 \text{ m}^3/\text{m}/\text{ano}$.

Na Figura 60 são apresentados os mapas de transporte residual com maior detalhe na região onde ocorre a reversão do transporte de sedimentos.

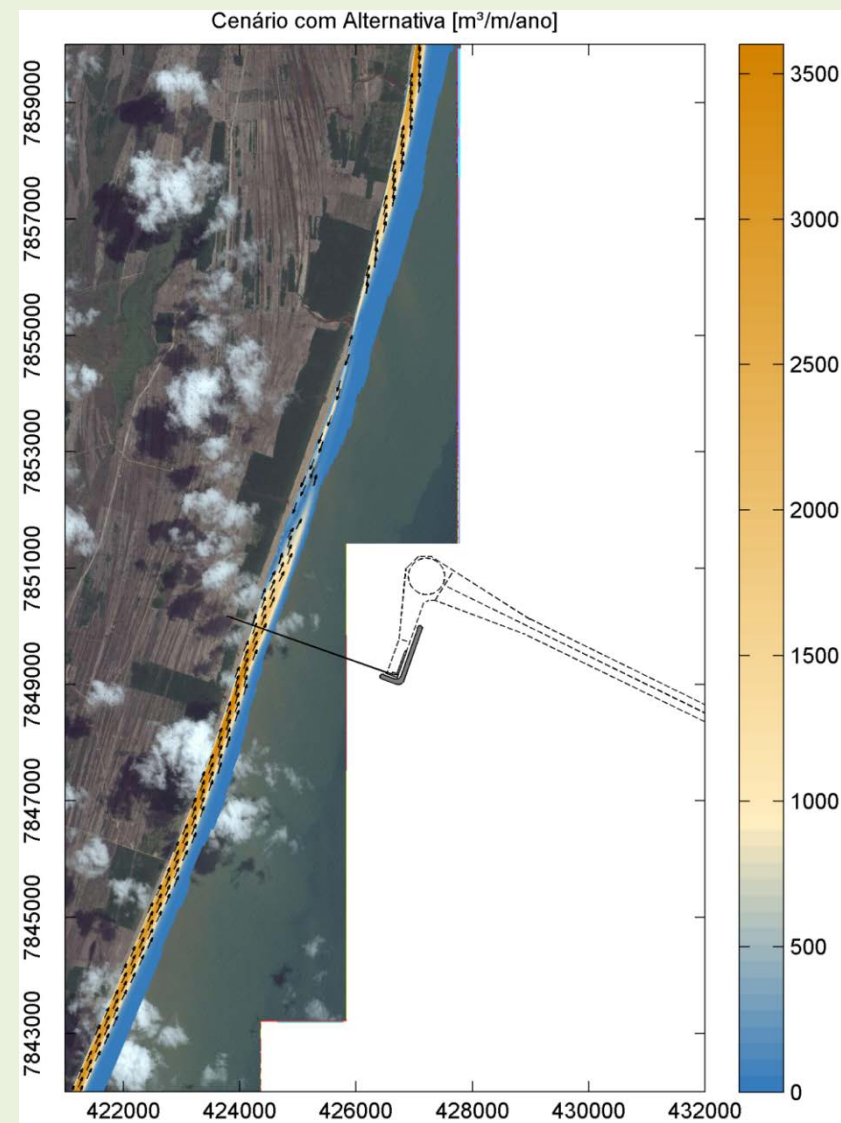
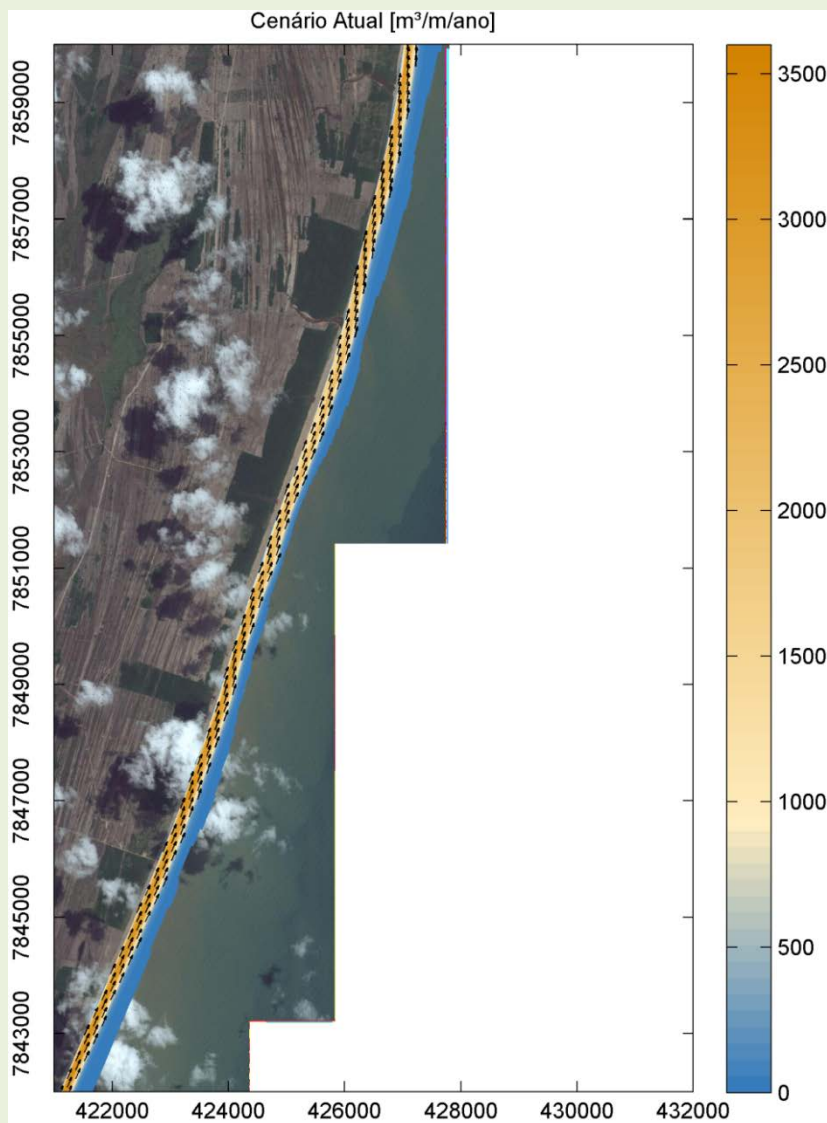


Figura 59: Transporte residual de sedimentos para o Cenário Atual (Direita) e Cenário com Alternativa (Esquerda) após 01 ano de simulação. Valores de volume expressos em $\text{m}^3/\text{m}/\text{ano}$.

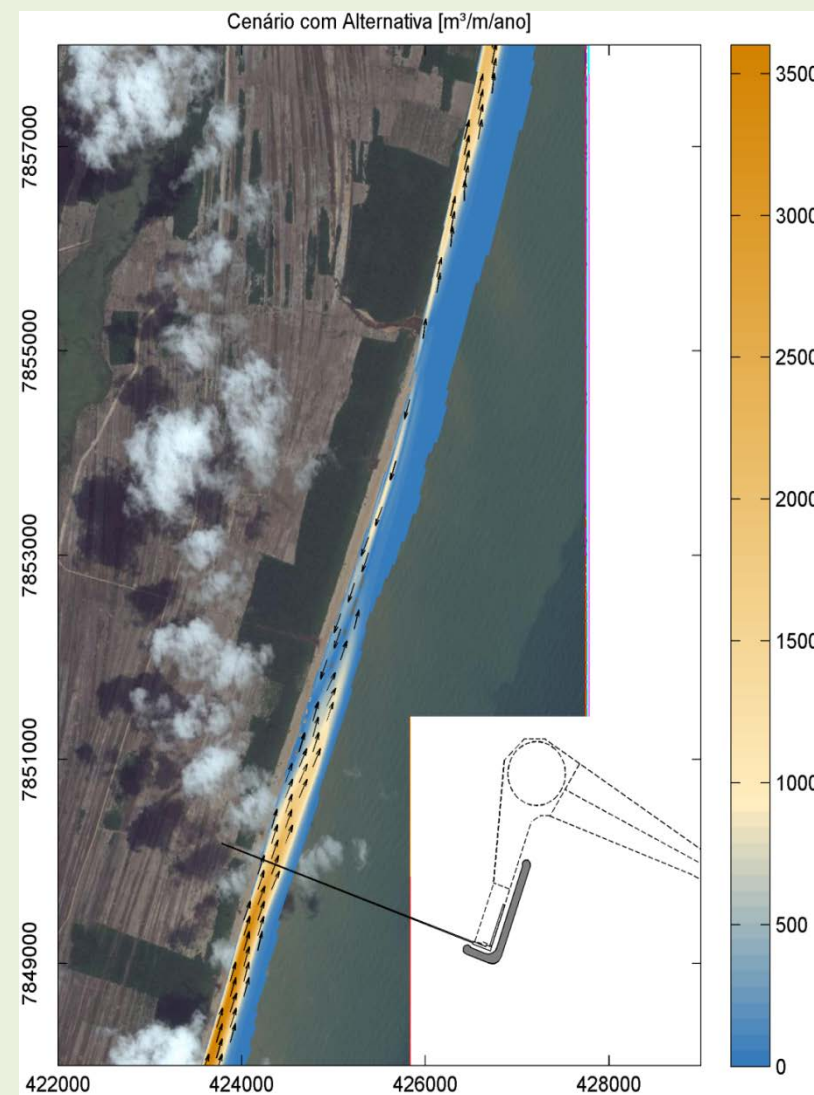
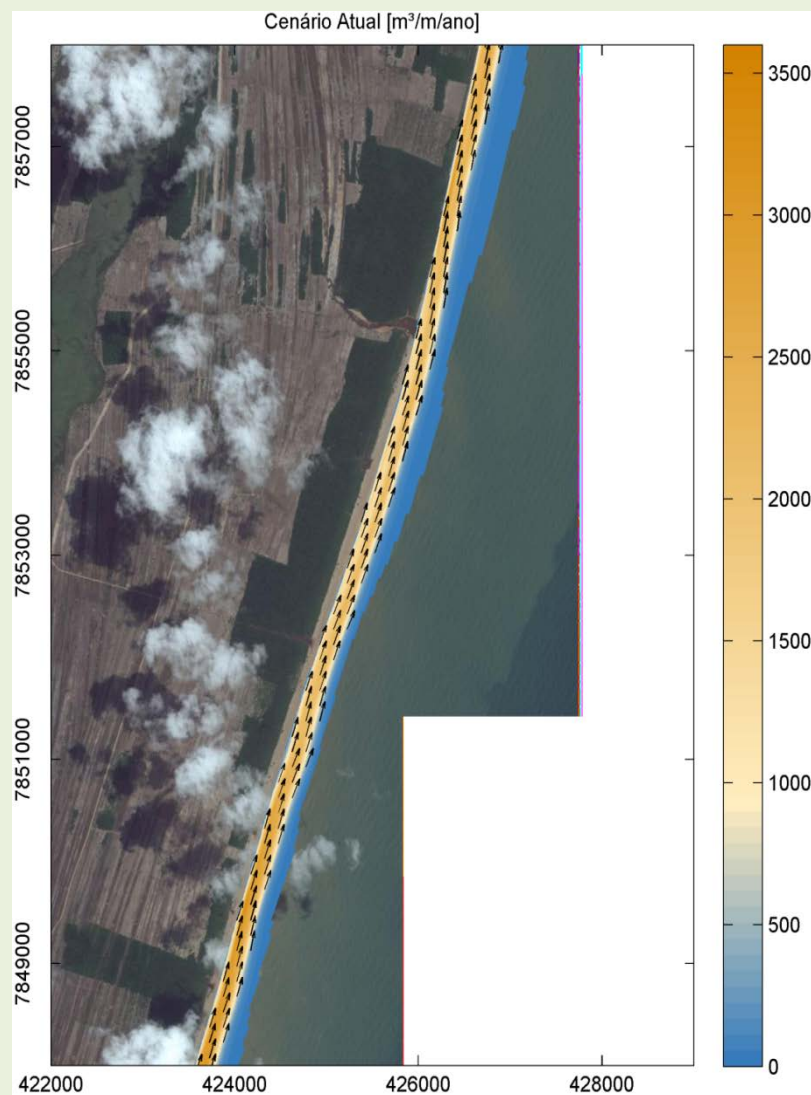


Figura 60: Transporte residual de sedimentos para o Cenário Atual (Direita) e Cenário com Alternativa (Esquerda) após 01 ano de simulação, em maior detalhe. Valores de volume expressos em $\text{m}^3/\text{m}/\text{ano}$. Figura com zoom na região de reversão do transporte. Vetores indicam a direção do transporte.

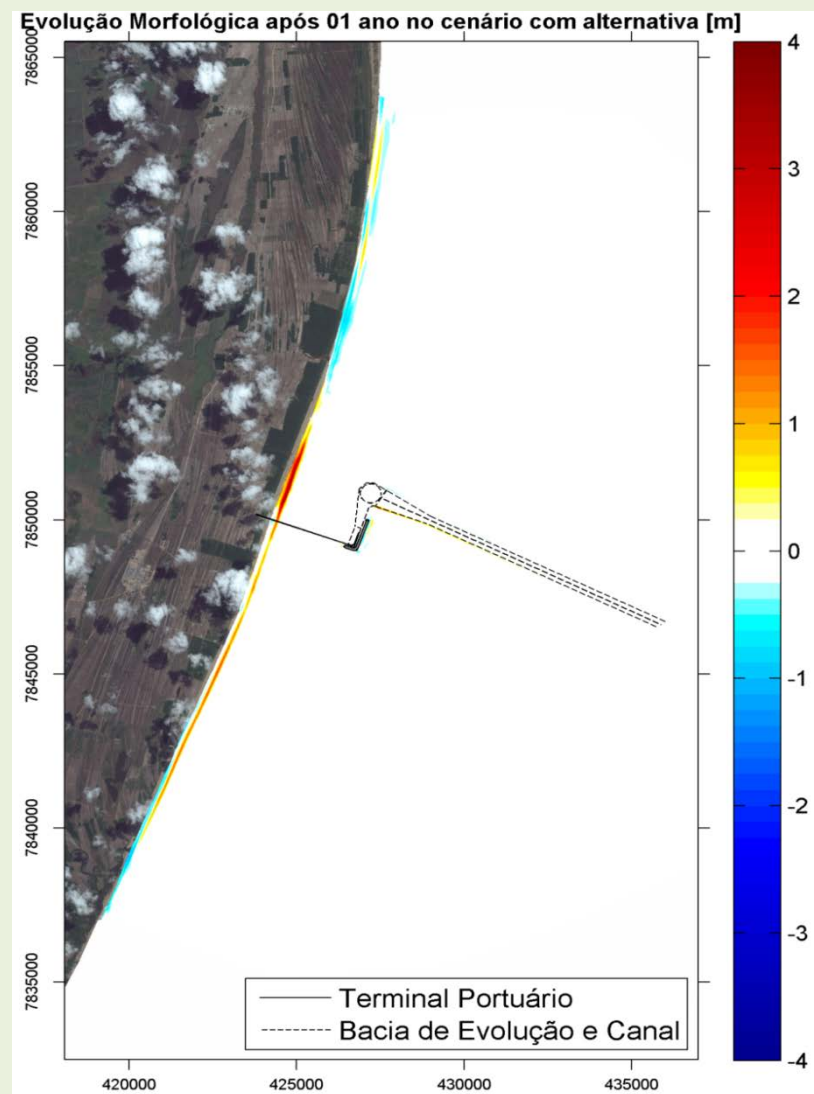
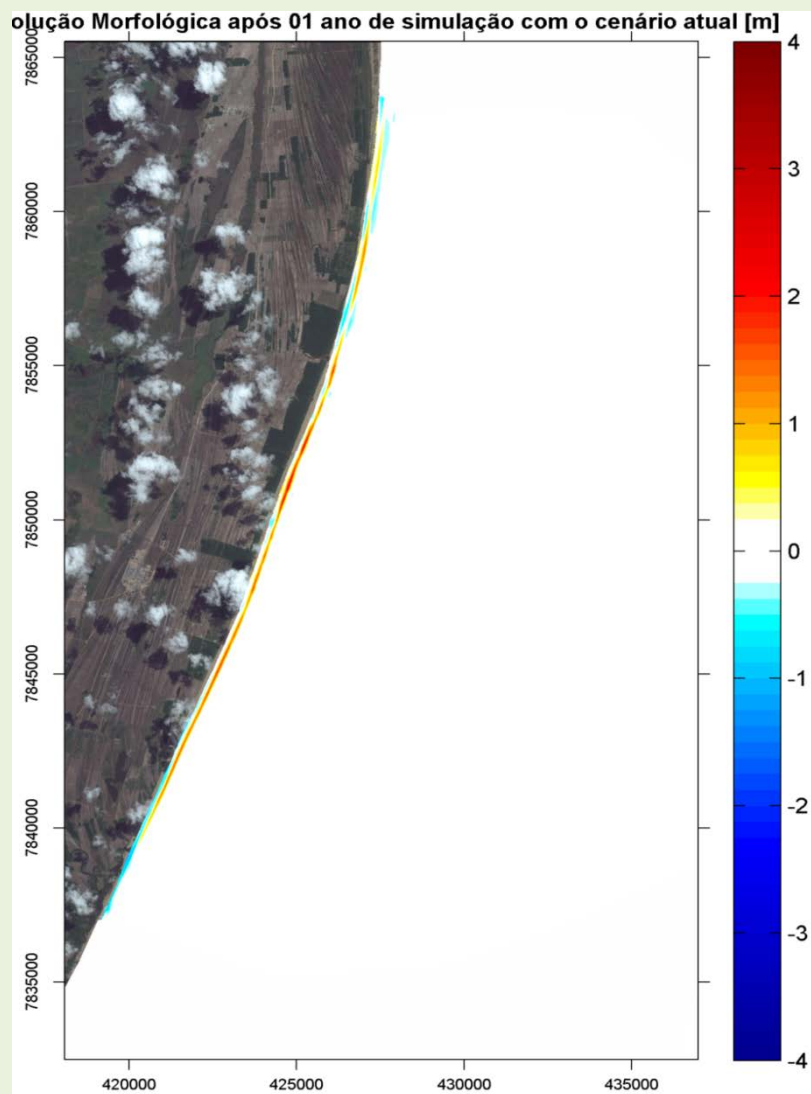


Figura 61: Evolução morfológica após um (01) ano no Cenário Atual (Direita) e Cenário com Alternativa (Esquerda). Cores representam a variação morfológica em metros.

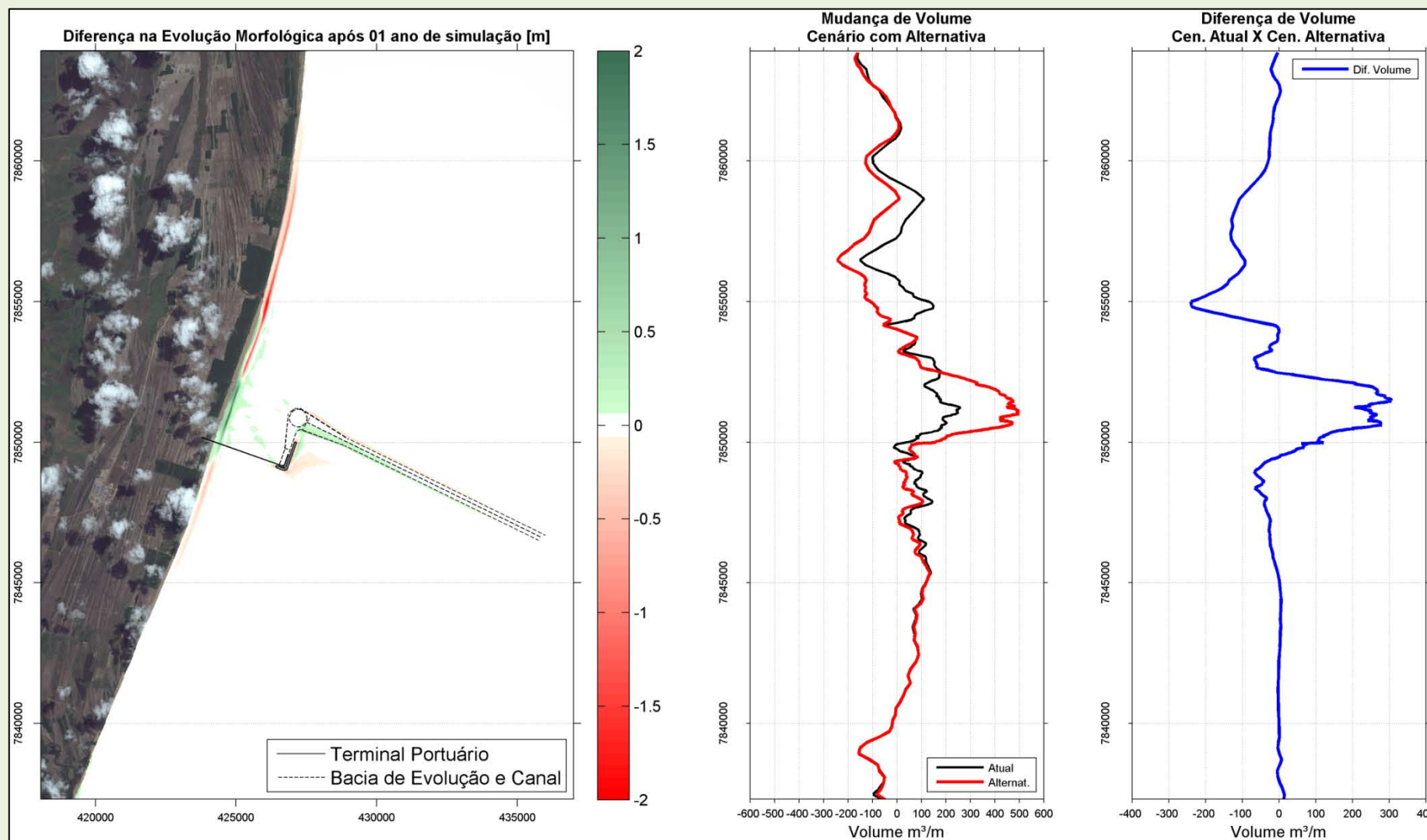


Figura 62: (A) Diferença na evolução morfológica após um (01) ano de simulação entre o Cenário Atual e Cenário com Alternativa. (B) Mudança de volume (m^3/m) no perfil praial comparando os dois cenários, ao longo da grade numérica. (C) Diferença de volume (m^3/m) entre os dois cenários ao longo da grade numérica.

AVALIAÇÃO DE IMPACTO APÓS 05 ANOS DE SIMULAÇÃO

O impacto na morfologia de fundo após 5 anos de simulação com o terminal portuário apresentou um padrão semelhante ao de 01 ano, porém com valores mais expressivos. Na Figura 67 é apresentada a evolução na morfologia após 5 anos com o cenário atual e o cenário com o terminal portuário implantado. Na Figura 68 é mostrada à esquerda a diferença na evolução morfológica (evolução morfológica relativa) entre os dois cenários após cinco anos, ao centro, um gráfico com a evolução anual da mudança volumétrica do cenário com alternativa, e à direita a diferença da evolução volumétrica entre os dois cenários (evolução volumétrica relativa). Observa-se que os setores mais afetados na praia de Cacimbas foram o setor central e norte, visto que o setor sul apresentou variações morfológicas reduzidas entre os cenários.

Após 5 anos de simulação, o setor central progradiou 210 metros (Figura 64) em direção ao mar, obtendo uma variação volumétrica relativa positiva de 307 m³/m em média. O setor norte foi caracterizado como erosivo, apresentando recuo da linha de costa de 62 metros, e variação negativa do volume relativo de 488 m³/m em média. Este setor hoje em dia já apresenta este comportamento, podendo ser observado nas imagens aéreas do *Google Earth* somente uma pequena extensão de faixa de areia, com tendência a retrair sobre a restinga. O setor sul apresentou padrão erosivo, com variação volumétrica relativa negativa de 41 m³/m em média.

O gráfico da evolução anual da morfologia (Figura 68 B) mostra que nos primeiros 2 anos de simulação a morfologia tende a mudar mais rapidamente para adquirir o novo perfil de equilíbrio gerado pelas estruturas do terminal portuário. A partir do terceiro ano, a variação morfológica diminui lentamente tendendo buscar um equilíbrio. Também é possível notar que o mesmo valor de mudança volumétrica que na situação atual é alcançado em 5 anos, na situação com a implantação do terminal portuário é alcançado em apenas 2 anos.

A magnitude da erosão e sedimentação nas bordas do talude no canal de navegação aumentou na simulação após 05 anos de implantação do terminal. Ocorreu erosão do topo do talude no lado norte do canal de navegação em aproximadamente 1 metro de altura e deposição na base do talude sul na mesma ordem de magnitude. As três pontas do quebra-mar (formato de L) apresentaram erosão de cerca de 2 metros.

Na Figura 63 é apresentada a delimitação dos setores analisados, juntamente com a localização dos perfis praias apresentados na Figura 64.

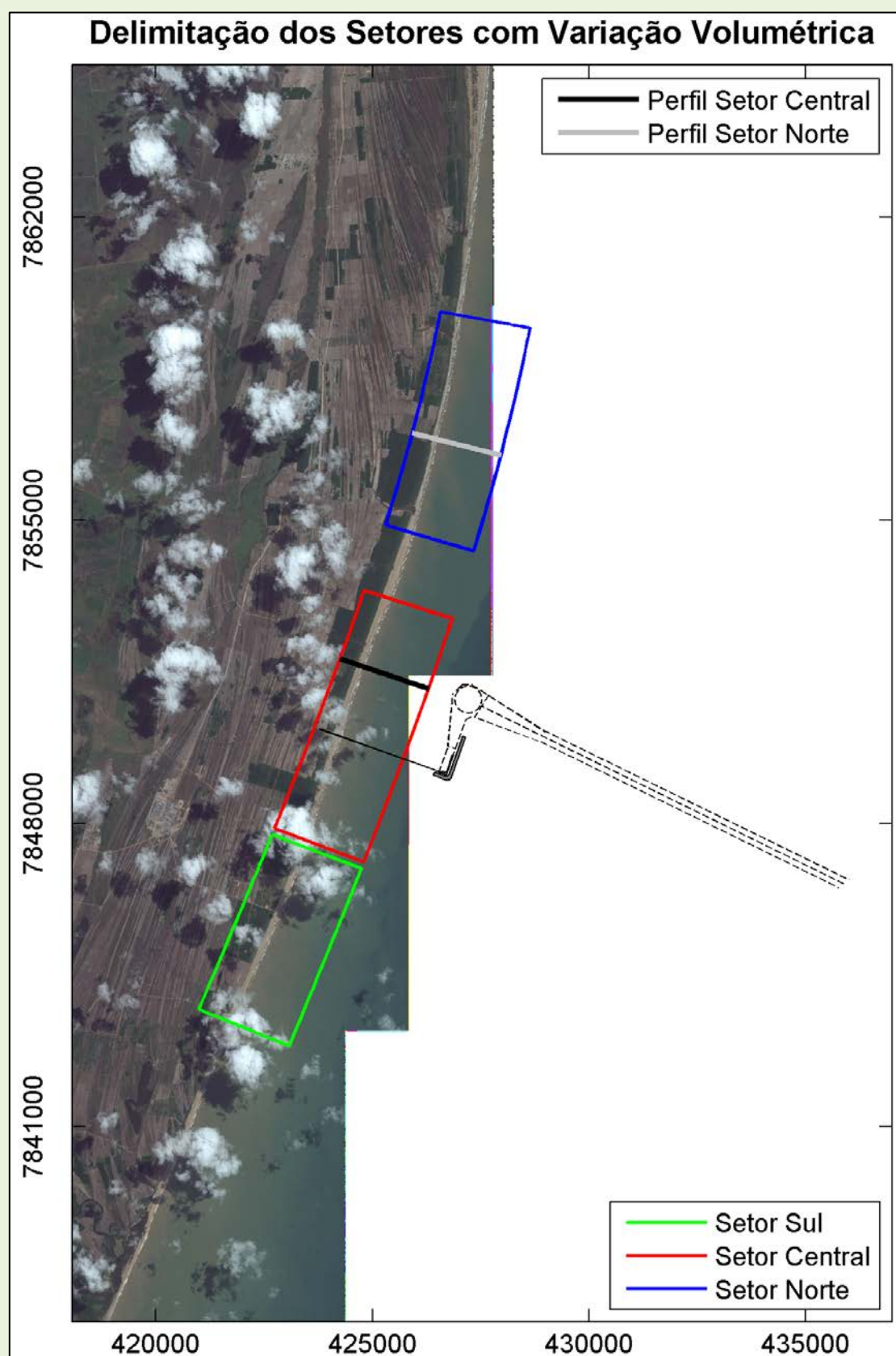


Figura 63: Delimitação dos setores com variação volumétrica (Sul, Central e Norte) e localização dos perfis praias apresentados na Figura 64.

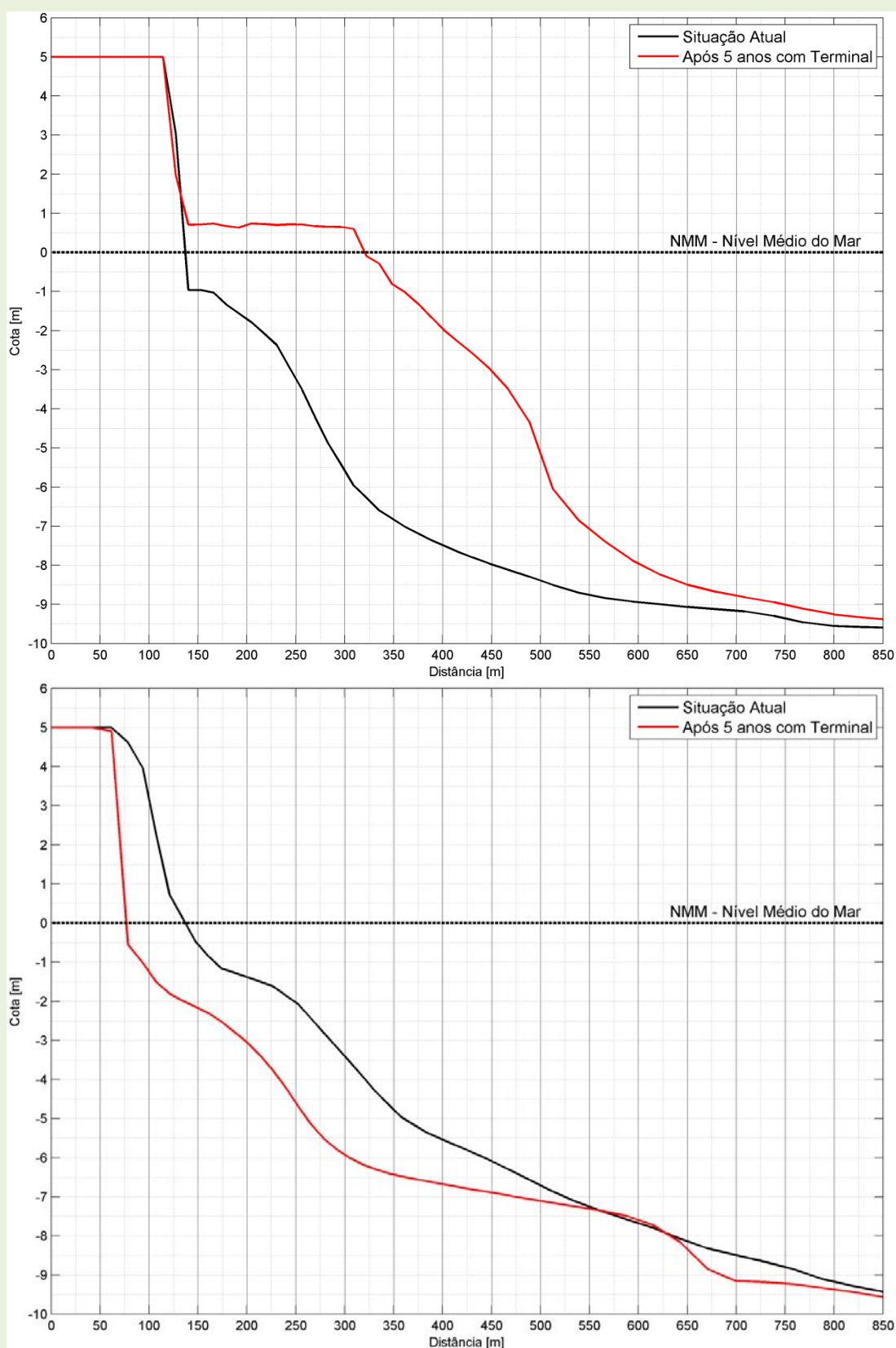


Figura 64: Perfil praias da berma até a profundidade de fechamento para o setor central (Acima) e setor norte (Abaixo) após cinco anos de simulação. Linha preta representa o Cenário Atual e vermelha o Cenário com Alternativa. Linha tracejada é o Nível Médio do Mar.

Na Figura 64 ainda é possível observar a forma do perfil praial após 5 anos de simulação, podendo-se inferir no estado morfodinâmico praia. No setor central o perfil após 5 anos ficou menos inclinado, mudando seu estado morfodinâmico de reflectivo para intermediário/dissipativo. Já o setor norte manteve a forma do perfil, somente ocorrendo a translação do perfil praial.

Os resultados do transporte de sedimentos resultante após cinco anos de simulação são apresentados na Figura 65.

O transporte residual de sedimentos continuou com o mesmo padrão, sentido sul para norte, nos setores sul e central, uma zona de reversão no setor norte com transporte de norte para sul, e voltando a seguir para norte após o setor norte. Os valores de transporte resultante obtidos foram muito similares à simulação de 01 ano com valores em torno de 3000 m³/m/ano nas regiões com sentido sul para norte e aproximadamente 500 m³/m/ano na região de reversão.

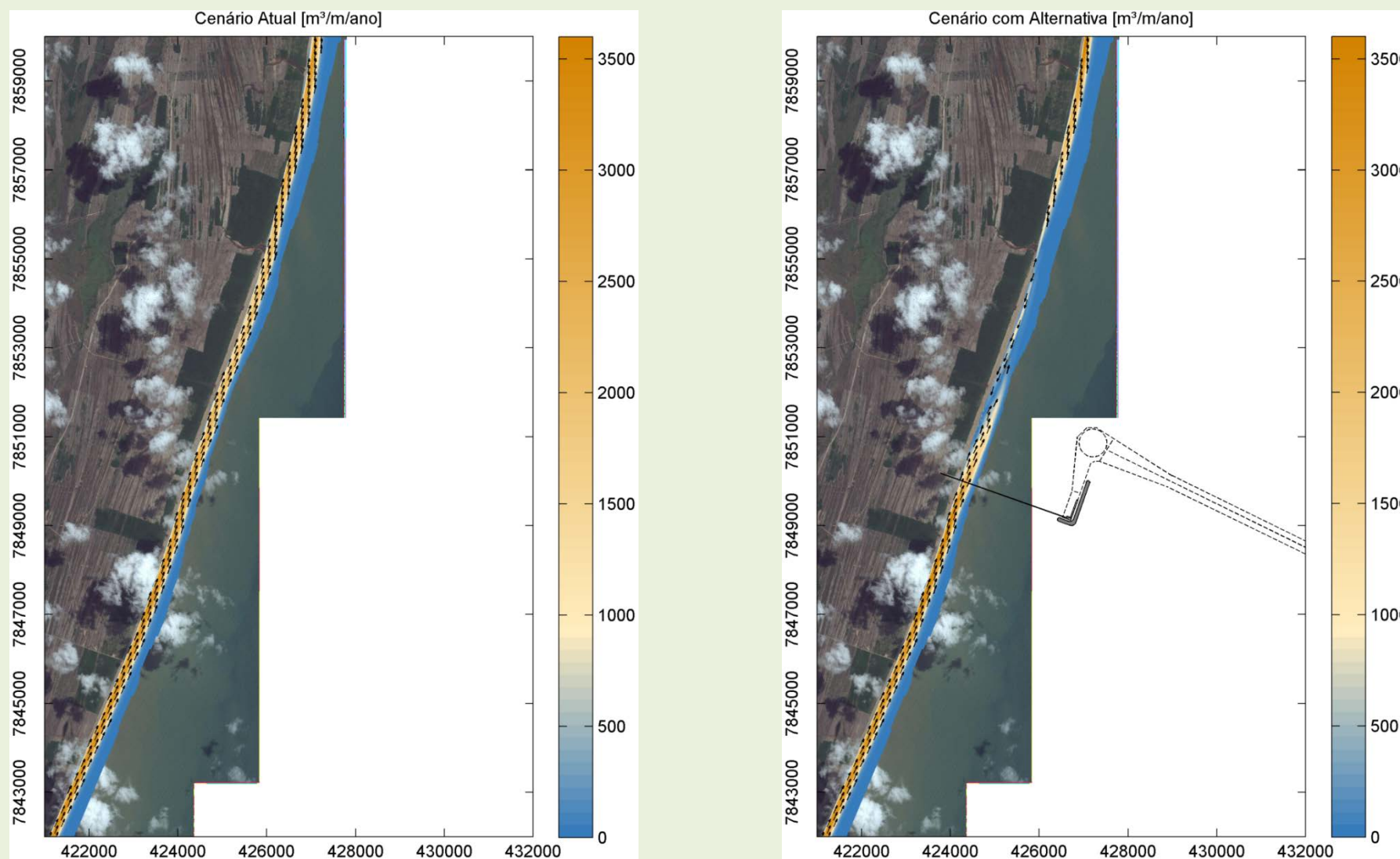


Figura 65: Transporte residual de sedimentos para o Cenário Atual (Direita) e Cenário com Alternativa (Esquerda) após 05 anos de simulação. Valores de volume expressos em $\text{m}^3/\text{m}/\text{ano}$.

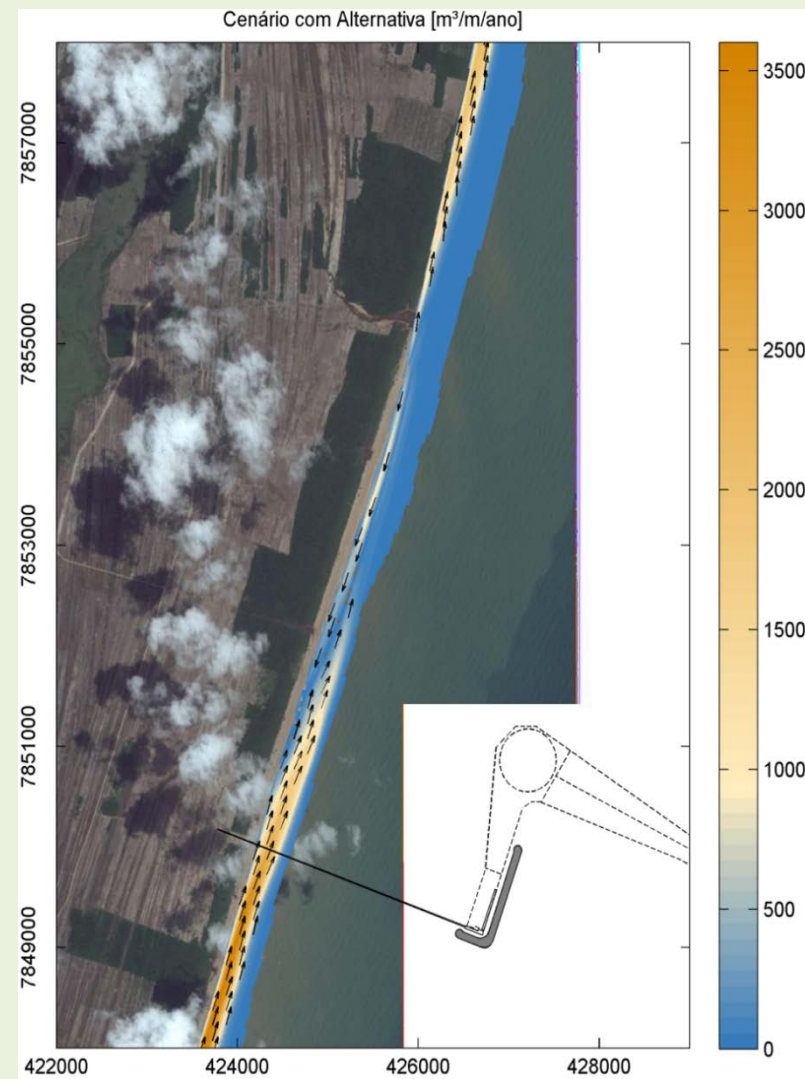
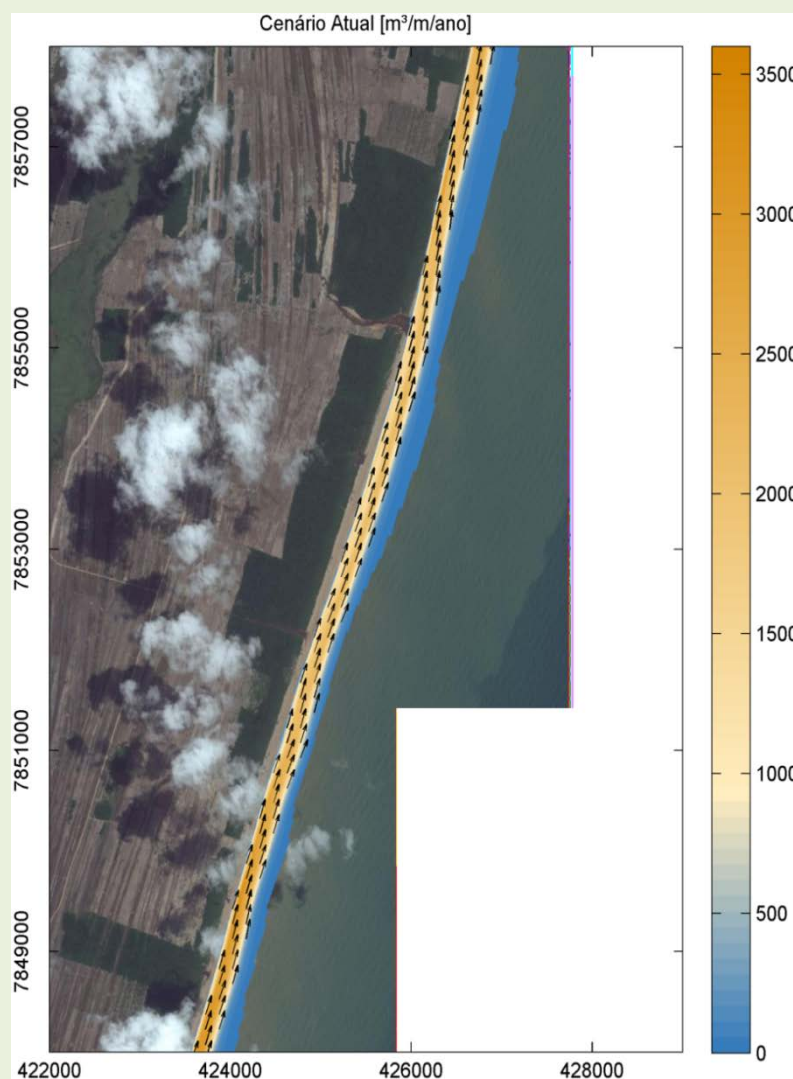


Figura 66: Transporte residual de sedimentos para o Cenário Atual (Direita) e Cenário com Alternativa (Esquerda) após 05 anos de simulação. Valores de volume expressos em $\text{m}^3/\text{m}/\text{ano}$. Figura com zoom na região de reversão do transporte. Vetores indicam a direção do transporte.

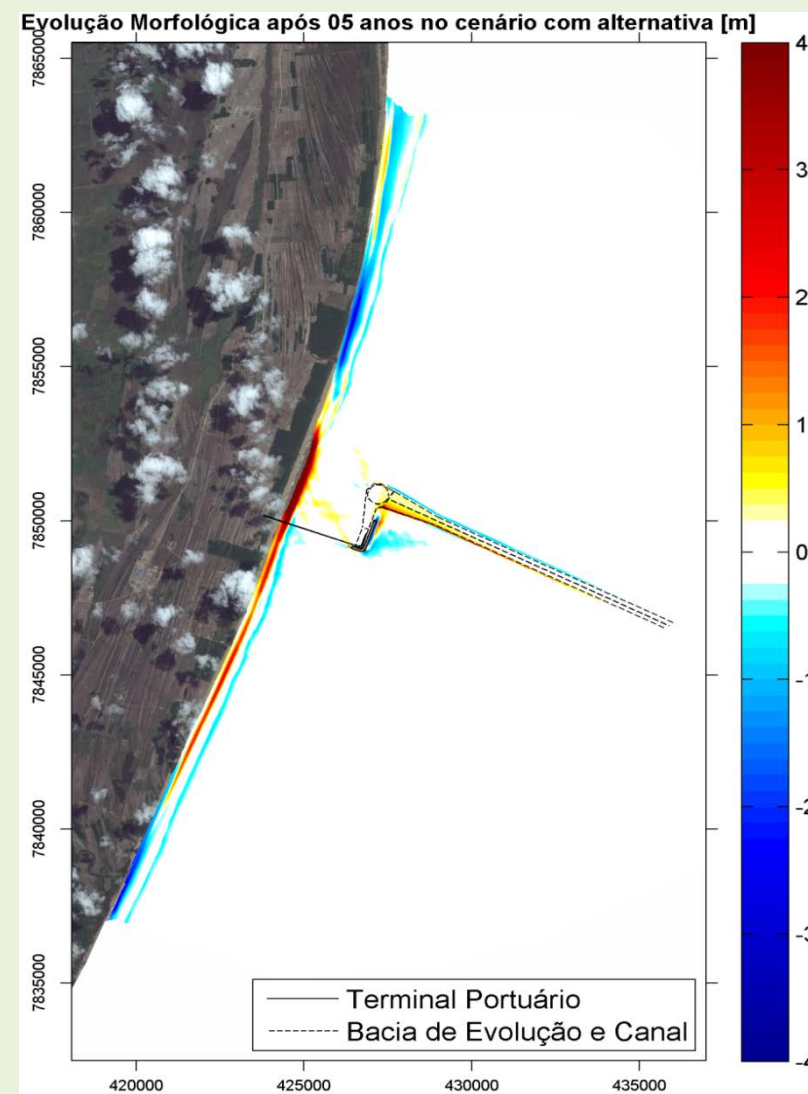
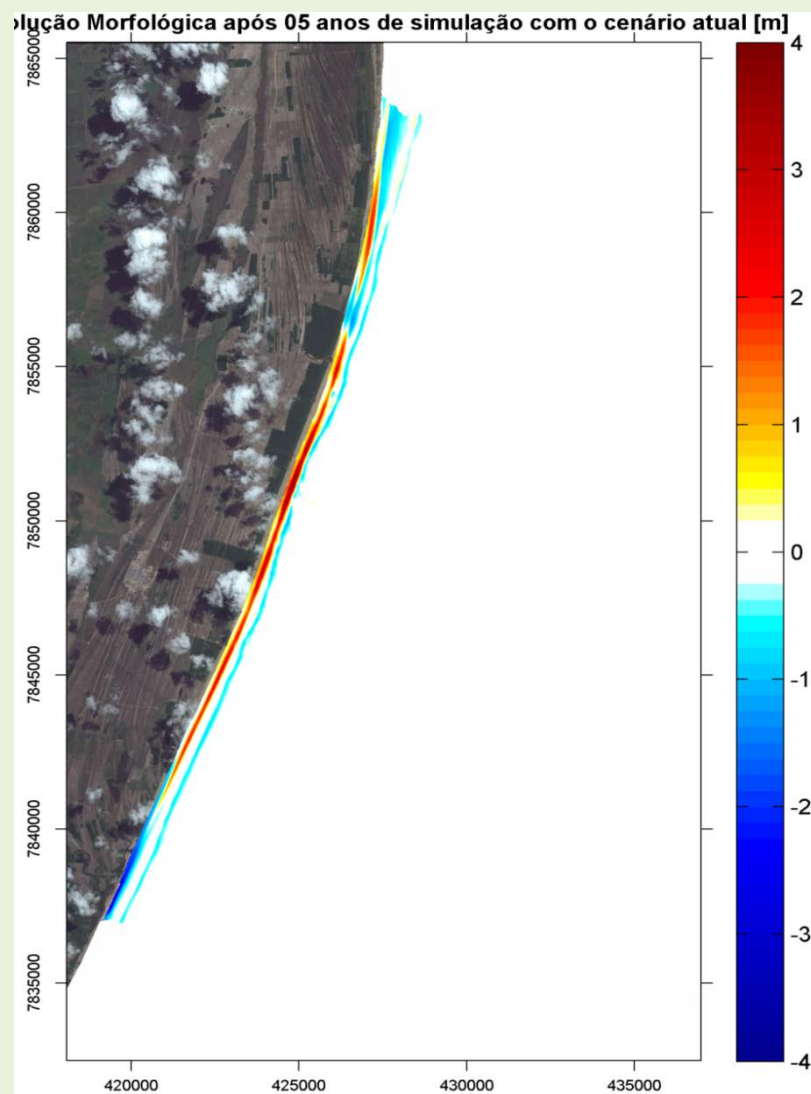


Figura 67: Evolução morfológica após cinco anos no Cenário Atual (Direita) e Cenário com Alternativa (Esquerda). Cores representam a a variação morfológica em metros.

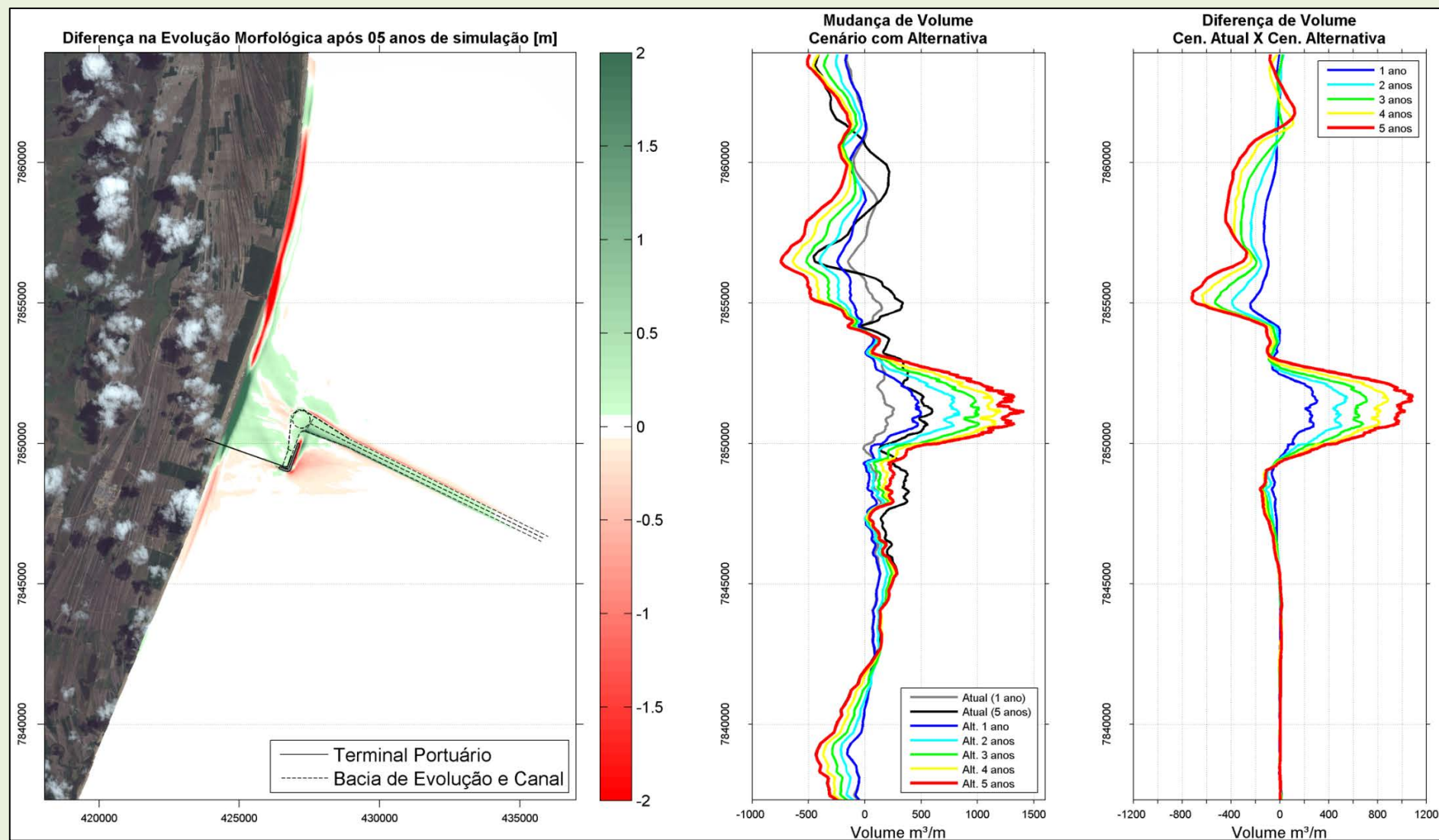


Figura 68: (A) Diferença na evolução morfológica após um (01) ano de simulação entre o Cenário Atual e Cenário com Alternativa. (B) Mudança de volume (m^3/m) no perfil praial comparando os dois cenários, ao longo da grade numérica. (C) Diferença de volume (m^3/m) entre os dois cenários ao longo da grade numérica.

4.4 TAXA DE SEDIMENTAÇÃO E PROJEÇÃO DE DRAGAGEM

As taxas de sedimentação foram calculadas anualmente até cinco anos após a criação do canal de navegação. Os resultados da sedimentação anual são apresentados Figura 70 até a Figura 74. Observa-se que o canal de navegação será o maior afetado, principalmente com alta sedimentação na porção sul do canal, gerada pela interação das fortes correntes de maré com o quebra-mar, ocasionando erosão nas regiões próximas a este e na base da estrutura, causada pela intensificação da velocidade de correntes. A bacia de evolução e berço serão menos afetados. Os volumes de sedimentação anuais e cota calculados para os três setores são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Volumes de sedimentação (m³) calculados.

	Canal (m³)	Bacia (m³)	Berço (m³)
Após 1 ano	144.000	26.000	2.000
Após 2 anos	284.000	53.000	4.000
Após 3 anos	423.000	83.000	6.000
Após 4 anos	571.000	114.000	8.000
Após 5 anos	727.000	145.000	10.000

As mínimas cotas encontradas nos três setores após cada ano são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: Mínimas profundidades encontradas nos três setores a cada ano. Valores expressos em relação ao nível de redução da DHN.

	Canal (m)	Bacia (m)	Berço (m)
Após 1 ano	22,23	20,82	19,98
Após 2 anos	21,95	20,63	19,96
Após 3 anos	21,65	20,41	19,94
Após 4 anos	21,31	20,17	19,91
Após 5 anos	20,94	19,90	19,89

Levando em consideração a redução da profundidade mínima do canal ao longo da simulação (devido à sedimentação), foi realizada uma análise de como a operabilidade do canal varia ao longo do tempo, considerando que a profundidade disponível (h_D) varia apenas em função do assoreamento do canal e da maré astronômica. Para esta análise, foi gerada uma previsão de maré para um ano (2013), com as constantes harmônicas utilizadas para forçar o modelo, e foi verificado, qual o percentual do tempo em que a profundidade disponível do canal era igual ou superior à profundidade necessária ($h_D \geq h_N$).

A profundidade do canal é um dos principais fatores que controlam a acessibilidade, e conseqüentemente, a operabilidade do porto (Lomónaco e Medina, 2005). Dentro desse aspecto, é necessário considerar que há uma profundidade mínima necessária para que o canal possa ser navegável (h_N), dependente do calado do navio em questão e da folga abaixo da quilha (FAQ) adotada. Por outro lado, a profundidade disponível do canal (h_D) é variável ao longo do tempo, dependendo de uma profundidade de referência (*e.g.* relativa ao NR da DHN ou ao nível médio), da maré astronômica, maré meteorológica e da presença de ondas. Um esquema destes conceitos é apresentado na Figura 69. É possível concluir que, para que o canal seja operativo, a profundidade disponível deve ser igual ou superior à profundidade necessária (*i.e.* $h_D \geq h_N$). Os valores de operabilidade do canal de navegação são apresentados na Tabela 13.

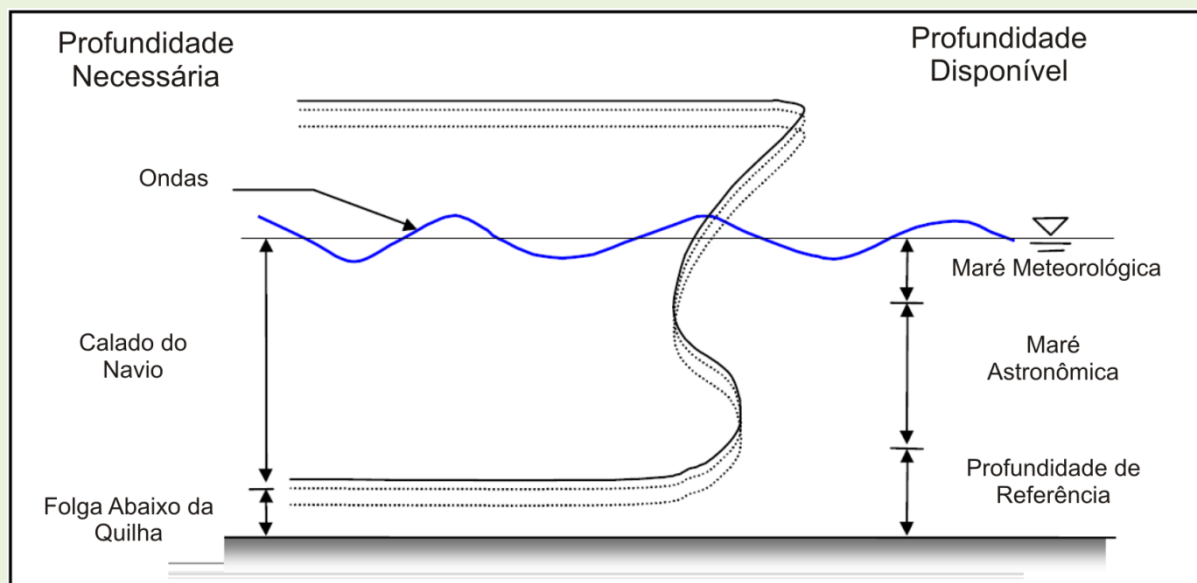


Figura 69 - Esquema de definição da profundidade necessária (h_N) e da profundidade disponível (h_D). Modificado de Lomónaco e Medina (2005).

Tabela 13: Porcentagem de operabilidade do terminal em um ano baseado na sedimentação ocorrente no canal de navegação.

TEMPO	OPERABILIDADE
Após 1 ano	82,56 %
Após 2 anos	64,28 %
Após 3 anos	46,85 %
Após 4 anos	26,09 %
Após 5 anos	7,04 %

Baseado nas informações apresentadas, sugere-se que o canal de navegação seja dragado a até cada 2 anos, para que não comprometa significativamente a operabilidade do terminal, compreendendo um volume aproximado de até 284.000 m³. Com relação à erosão causada na base do quebra-mar, sugere-se a utilização de alguma tecnologia como forma de mitigação deste processo, que alcançou erosão aproximada entre 4 e 5 metros em 5 anos.

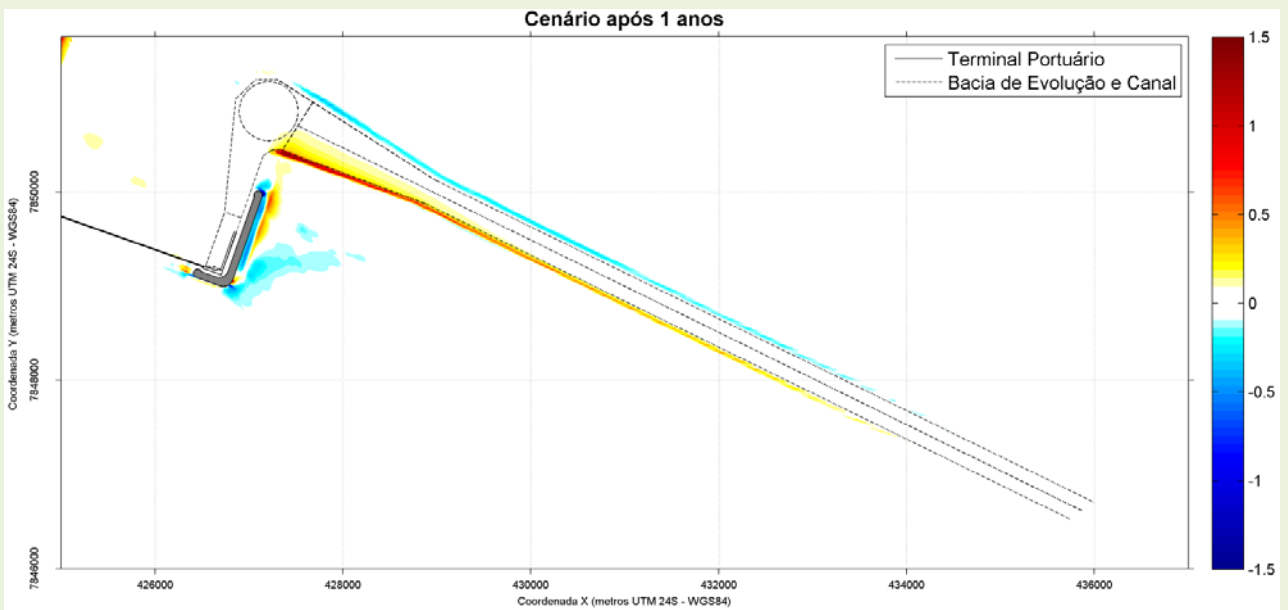


Figura 70: Sedimentação (cores quentes) e erosão (cores frias) ocorrida no canal de navegação, bacia de evolução e berço após 01 ano. Valores expressos em metros.

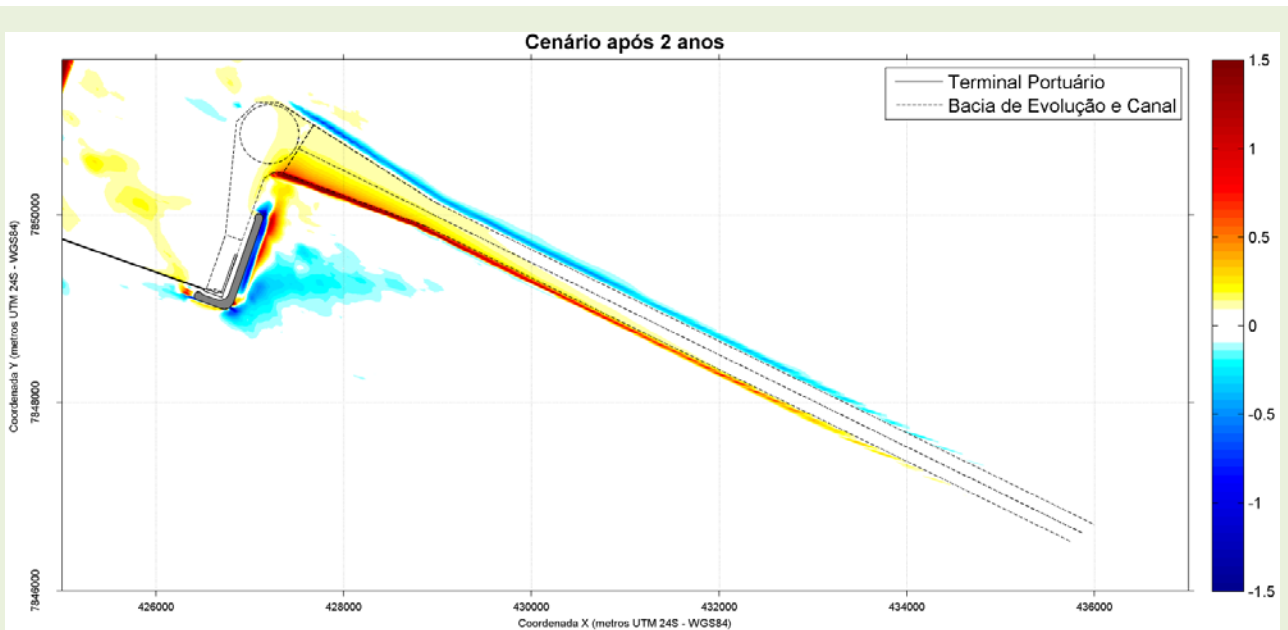


Figura 71: Sedimentação (cores quentes) e erosão (cores frias) ocorrida no canal de navegação, bacia de evolução e berço após 02 anos. Valores expressos em metros.

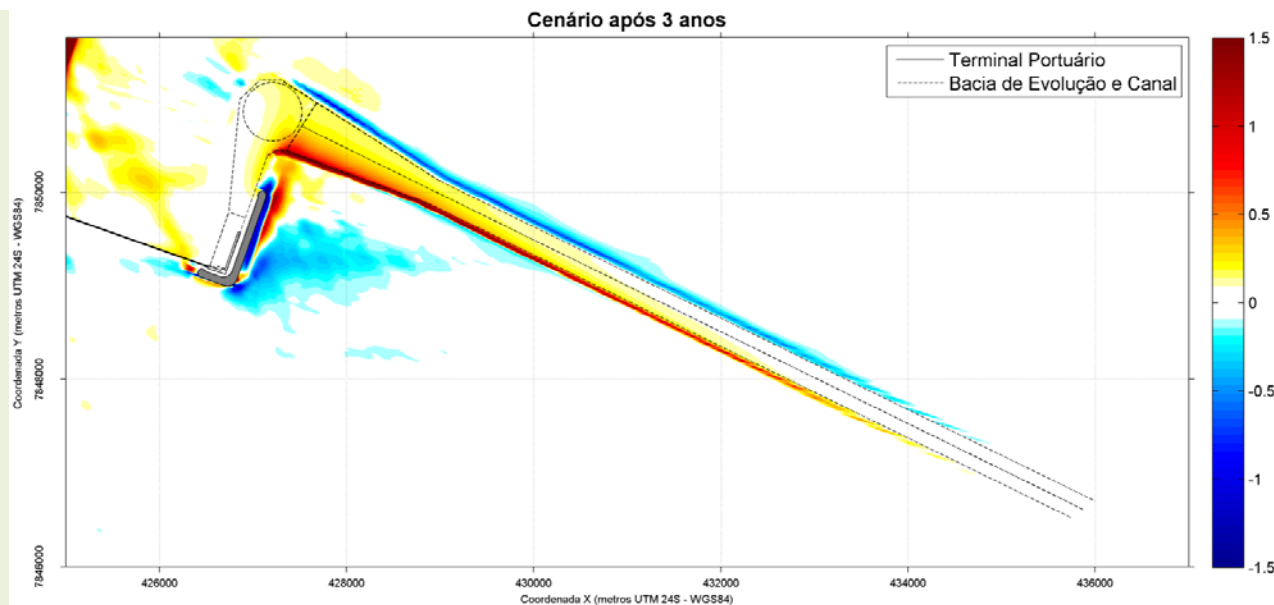


Figura 72: Sedimentação (cores quentes) e erosão (cores frias) ocorrida no canal de navegação, bacia de evolução e berço após 03 anos. Valores expressos em metros.

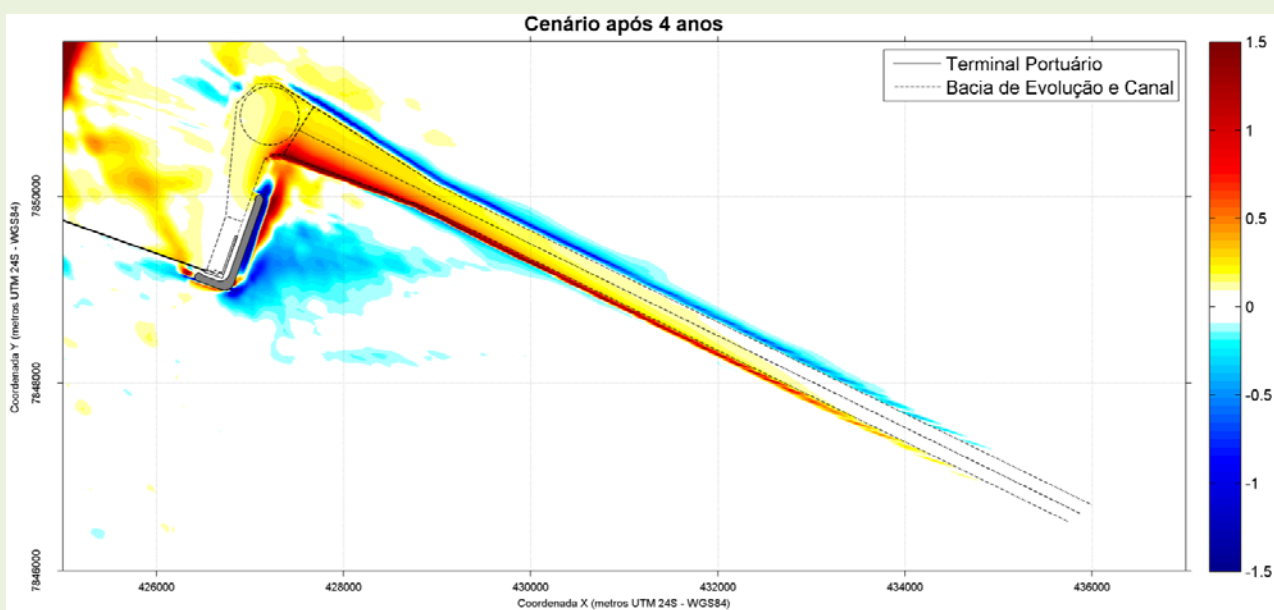


Figura 73: Sedimentação (cores quentes) e erosão (cores frias) ocorrida no canal de navegação, bacia de evolução e berço após 04 anos. Valores expressos em metros.

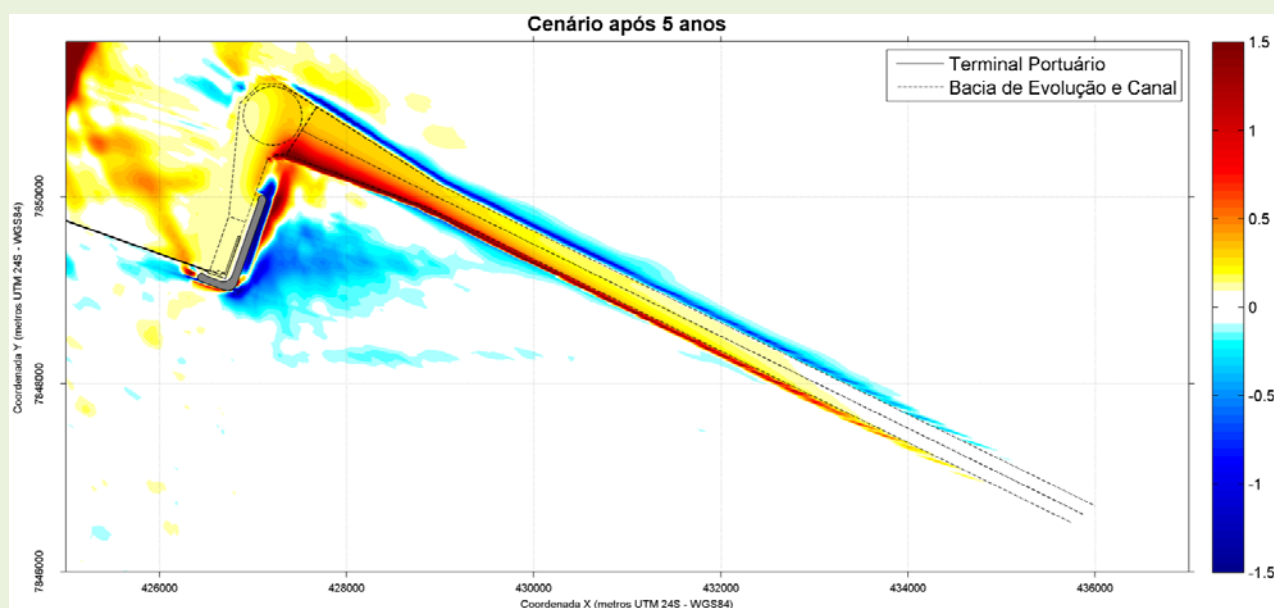


Figura 74: Sedimentação (cores quentes) e erosão (cores frias) ocorrida no canal de navegação, bacia de evolução e berço após 05 anos. Valores expressos em metros.

4.5 MODELAGEM MORFOLÓGICA DE ESTABILIZAÇÃO DA LINHA DE COSTA

Para a melhor apresentação dos resultados do modelo de estabilização da linha de costa, perfis praias (perpendiculares à linha de costa) com 1,5 km foram criados ao longo de toda a extensão da grade local, espaçados a cada 500 metros. Portanto, para cada um desses perfis a batimetria no final de cada ano simulado é obtida.

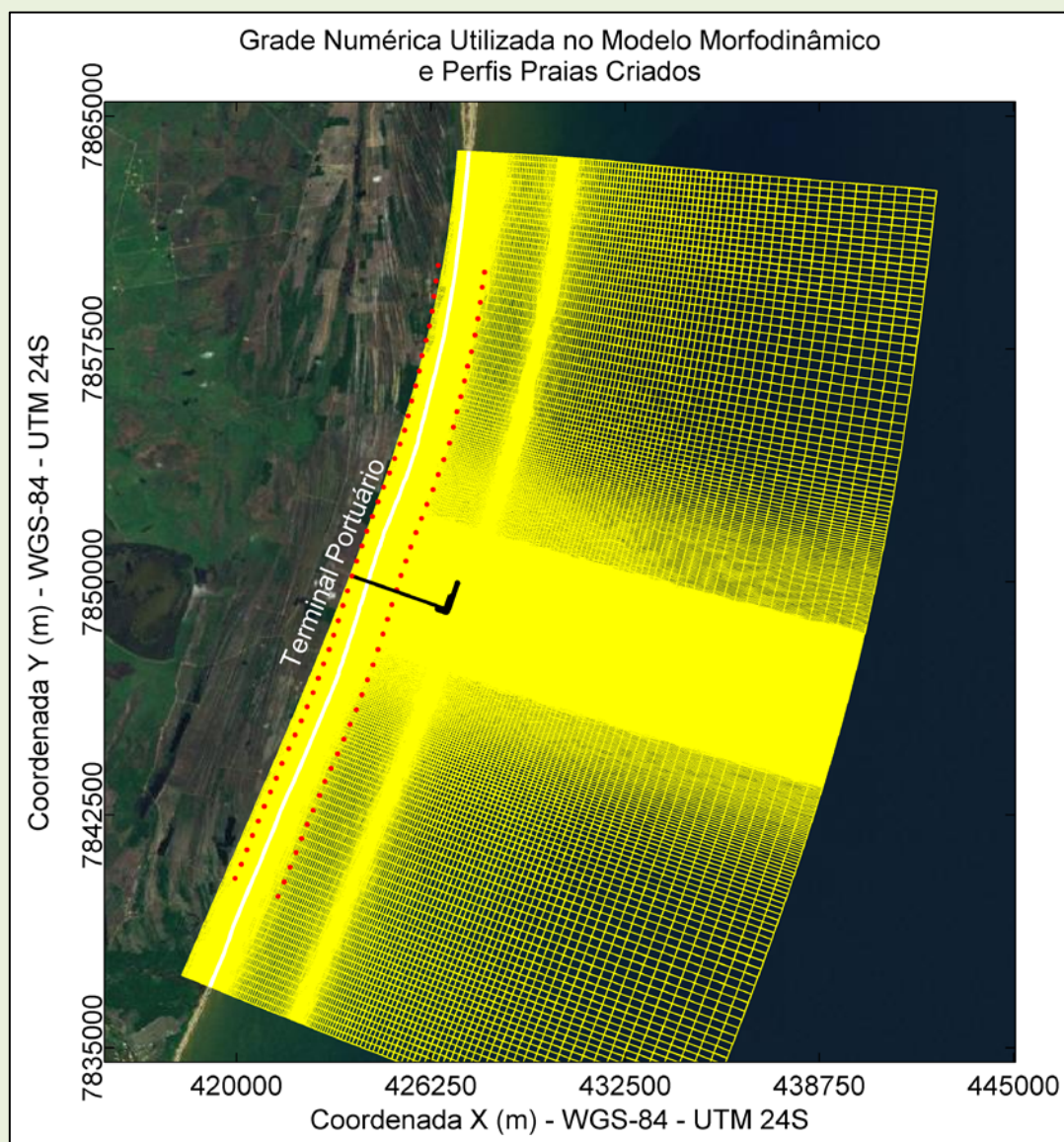


Figura 75: Perfis praias criados ao longo da grade local (em vermelho os pontos iniciais e finais de cada perfil criado; em branco a isóbata de 0 metros; em preto as estruturas do terminal portuário).

Duas análises foram realizadas: calculou-se a variação da posição da linha de costa a cada ano (diferença entre a posição da isóbata de 0 metros na batimetria final e na inicial de cada ano) e calculou-se a variação da linha de costa ao longo dos anos (diferença entre a posição da isóbata de 0 metros na batimetria final de cada ano em relação à batimetria inicial).

A primeira análise permite determinar o tempo necessário para a estabilização da linha de costa. Quando a variação anual da linha de costa estiver próxima de zero, ou seja, quando a praia parar de crescer ou erodir, pode-se considerar que está estabilizada. A segunda análise apresenta como será a configuração da linha de costa em planta após determinado período de tempo.

Após o uso dos modelos morfodinâmicos devidamente calibrados, constatou-se uma área de erosão na porção norte da área de estudo e uma área de deposição na porção central (em frente ao futuro terminal) ao longo dos anos, estando essas áreas em destaque na Figura 76. A linha de costa nas demais regiões apresentou comportamento praticamente constante, não tendo ocorrido erosão ou deposição significativas. Na Figura 77 podem-se observar com maior detalhamento as duas áreas destacadas na Figura 76.

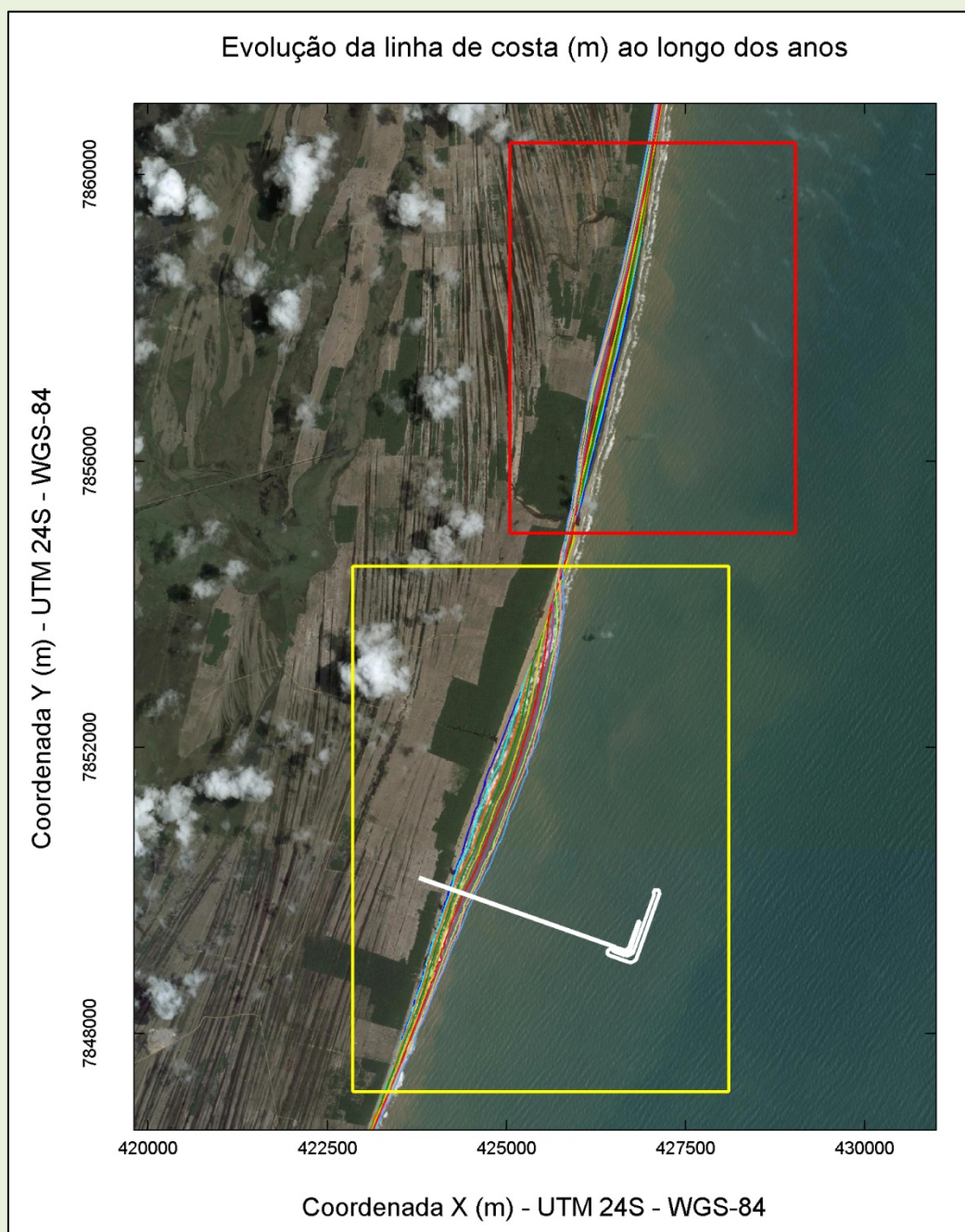


Figura 76: Evolução da linha de costa ao longo dos anos na área de estudo – erosão e deposição.

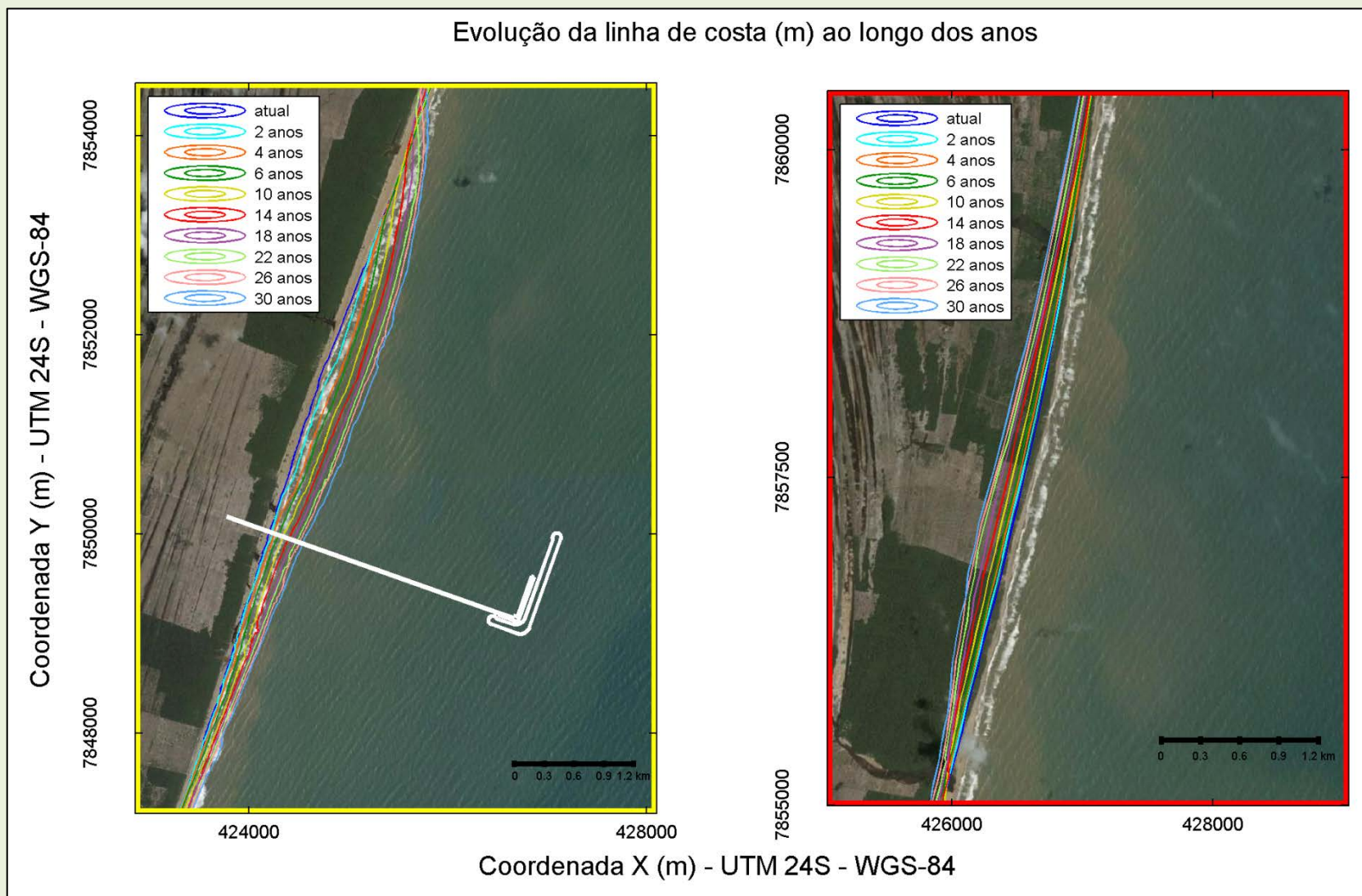


Figura 77: Evolução da linha de costa ao longo dos anos na porção central (em amarelo) e na porção norte (em vermelho).

Na porção central da área de estudo, especificamente nos primeiros quatro anos, a linha de costa progradiou 150 metros, o que representa uma taxa de 75 m a cada dois anos ou 37,5 m/ ano. Entre o quarto e o décimo quarto ano a taxa de progradação permaneceu constante (aproximadamente 12,5 m/ano), e a partir dos 14 anos essa taxa diminuiu para aproximadamente 10 m/ano, mantendo-se constante até os 30 anos analisados. A erosão da linha de costa na porção norte da área de estudo manteve-se em uma taxa constante entre os 2 e os 30 anos pós obra (10 m/ ano) (Figura 78B).

A linha de costa apresentará uma configuração diferente da observada antes da obra: porção aérea mais extensa em frente ao empreendimento, com uma progradação de cerca de 480 metros, em relação à área mais ao norte do terminal, onde ocorreu uma diminuição da porção aérea em cerca de 250 metros (Figura 78C). Apesar de ter ocorrido significativa erosão na simulação, a presença de vegetação que ocorre nessa área tende a barrar e, portanto, retardar o processo de retirada de sedimentos. Pelo fato do modelo numérico não ser capaz de reproduzir a morte ou crescimento de vegetação ao longo das feições morfológicas, preferiu-se optar por representar a área de estudo como uma costa totalmente arenosa, sem vegetação, assumindo uma característica conservadora do modelo e assim predizendo máximos valores de erosão.

A escala temporal abordada na simulação morfológica foi considerada longa, e assumir um período de tempo superior a 30 anos seria embutir possíveis incertezas na evolução morfológica. Ressalta-se que o resultado do modelo numérico é uma representação esquematizada do mundo real, e que quanto maior a escala temporal analisada maior quantidades de incertezas são incorporados aos resultados. Fatores oceanográficos isolados podem alterar a sequência dos acontecimentos e consequentemente as formas das feições morfológicas.

Sugere-se o monitoramento de perfis praias topobatimétricos (porções aérea e subaérea) na área de influência apontada pelo modelo (setores norte, central e sul) durante a execução da obra e após a sua conclusão. Devem ser monitoradas as taxas de acreção e erosão nos setores apontados e comparados com os resultados do modelo. Caso os valores diferenciem excessivamente dos indicados por este, a modelagem morfológica de estabilização da linha de costa deve ser revisitada com nova calibração morfológica utilizando os dados de perfis topobatimétricos adquiridos pelo monitoramento.

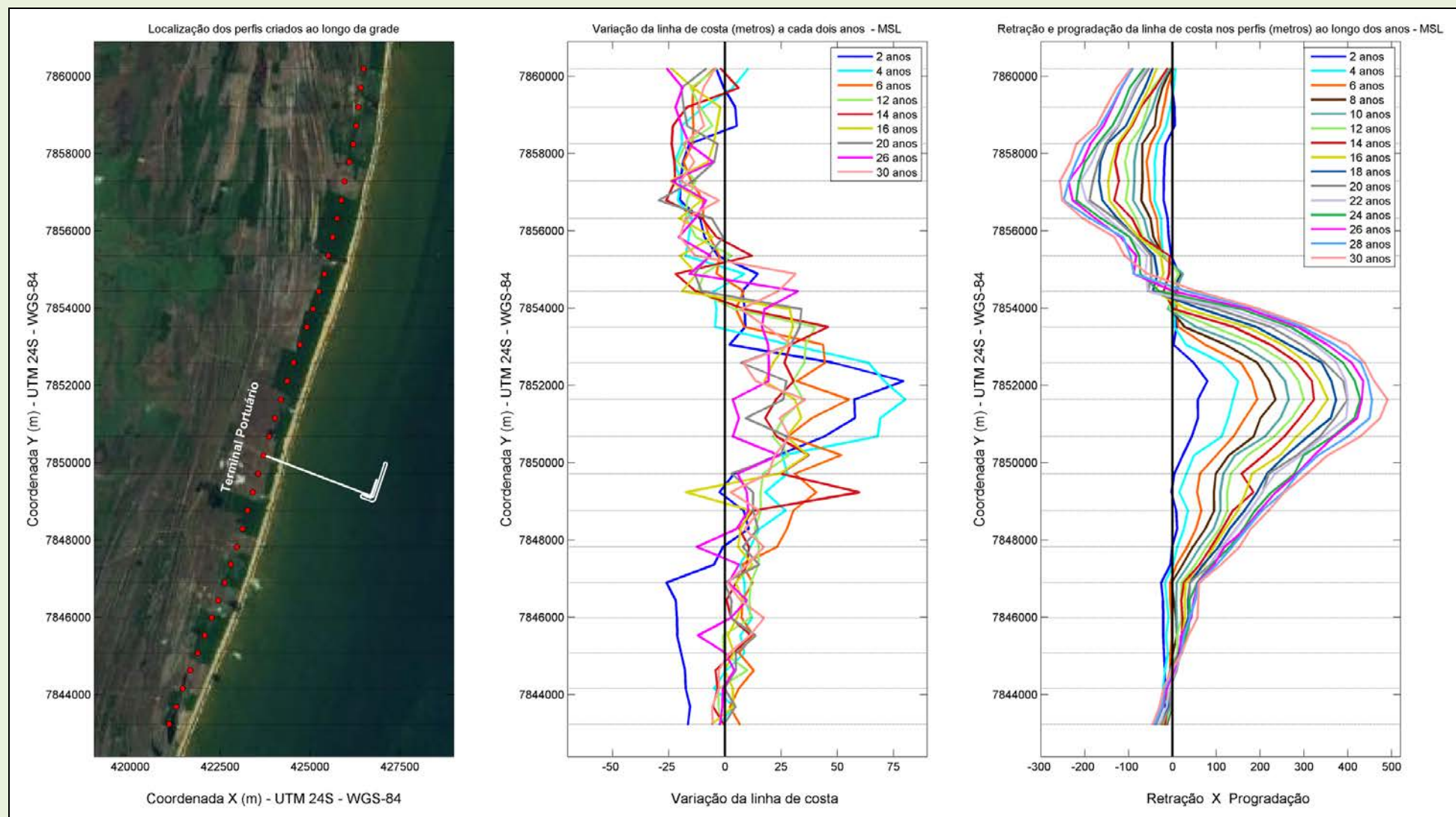


Figura 78: A. perfis criados ao longo da grade local; B. variação da linha de costa a cada período de tempo (em metros); C. retração e progradação da linha de costa ao longo dos 30 anos (em metros).

4.6 BASE TEÓRICA SOBRE EVOLUÇÃO DA FORMA EM PLANTA

Considerando o resultado de progradação da linha de costa em frente ao quebra-mar do terminal portuário Manabi, foi realizada uma análise da futura forma em planta da praia de Cacimbas. Para a análise da estrutura (Quebra-mar) foram utilizadas as metodologias propostas por DALLY e POPE (1986), e AHRENS e COX (1990), além do modelo parabólico de equilíbrio da forma em planta de praias, desenvolvido por HSU e EVANS (1989).

DALLY e POPE (1986) propuseram limites da razão entre o comprimento da estrutura e sua distância da costa (Ls/Y - Figura 79) para definir o tipo de resposta esperada na linha de costa atrás da estrutura (tômbolo, saliência ou proteção uniforme). POPE e DEAN (1986) definiram uma relação entre as razões de comprimento dos quebra-mares sobre a distância entre eles (Ls/Lg) e distância da costa sobre a profundidade média do quebra-mar (Y/ds), definindo cinco tipos de respostas possíveis. AHRENS e COX (1990) definiram um índice de resposta da praia ($Is = \exp(1.72 - 0.41 Ls/Y)$), e enquadraram seus valores aos tipos de resposta propostos por POPE e DEAN (1986):

$Is = 1$ - Formação de tômbolo permanente;

$Is = 2$ - Tômbolos periódicos;

$Is = 3$ - Saliências bem desenvolvidas;

$Is = 4$ - Saliências pouco pronunciadas;

$Is = 5$ - Sem sinuosidade.

Como no caso o terminal portuário de Manabi há apenas uma estrutura (01 quebra-mar), o modelo apresentado por POPE e DEAN (1986) não se aplica.

Na Tabela 14 são apresentados os resultados da previsão da linha de costa adjacente à estrutura pelos modelos analíticos de Dally e Pope (1986) e Ahrens e Cox (1990).

Tabela 14. Características e respostas estimadas para o quebra-mar do terminal portuário Manabi.

Comprimento ($Ls - m$)	Distância da Costa ($Y - m$)	Ls/Y (Dally e Pope, 1986)	Is (Ahrens e Cox, 1990)
1000	2500	0,40 (Saliência/Proteção Uniforme)	4,74 (Saliência pouco pronunciadas à Sem Sinuosidade)

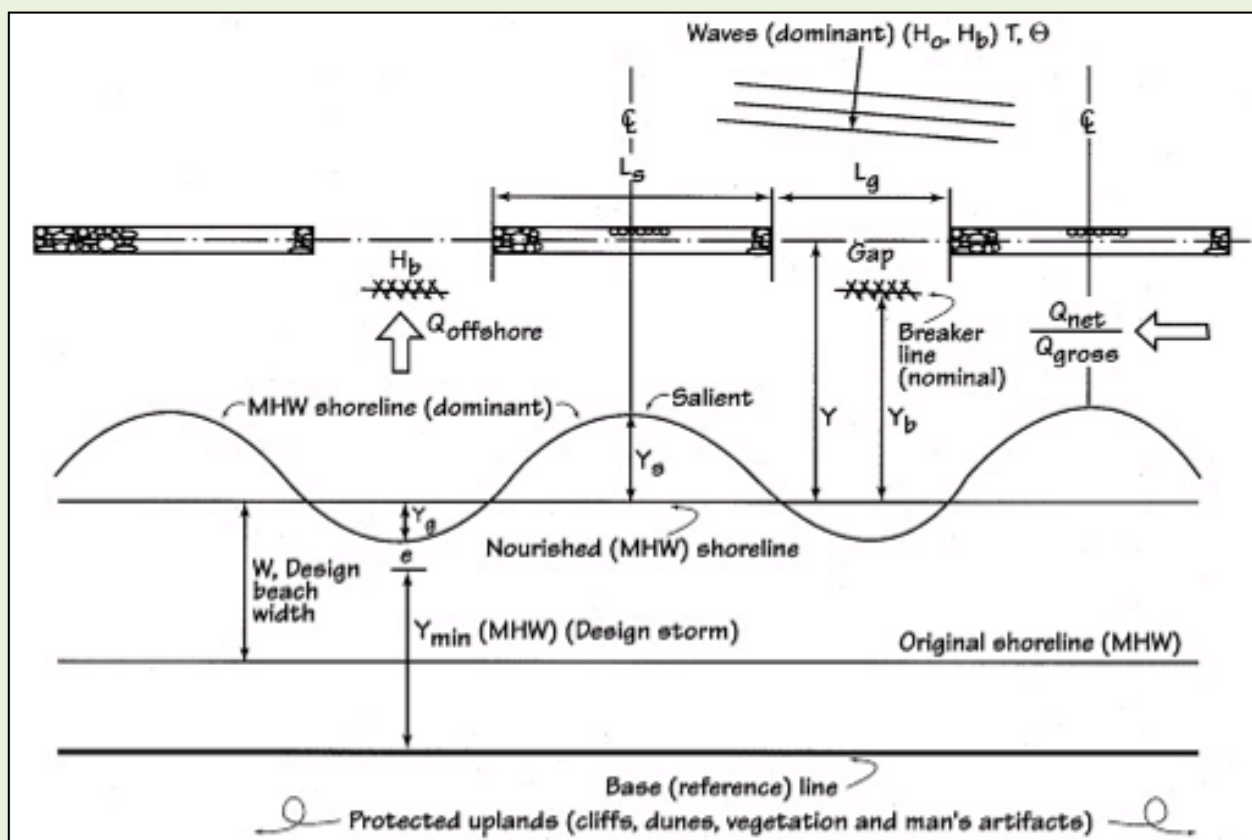


Figura 79. Desenho esquemático das variáveis utilizadas nas formulações de Dally e Pope (1986), Pope e Dean (1986) e Ahrens e Cox (1990).

Para realizar a modelagem analítica da forma em planta de equilíbrio da linha de costa após a implantação do quebra-mar foi utilizado o modelo parabólico de HSU e EVANS (1989) e HSU *et al.* (2007). Este modelo segue o conceito de equilíbrio em praias de enseada, ligado à estabilidade tanto do perfil quanto da forma em planta da praia. Sua formulação matemática consegue prever a forma em planta da linha de costa estável de praias, utilizando parâmetros da geometria da baía e da dinâmica, como o ponto de difração e a direção predominante de onda. Com isso ela possui maiores aplicações na detecção da modificação da linha de costa em função da alteração do ponto de difração (*e.g.* obras de engenharia costeira) ou da direção das ondas mais energéticas. A equação parabólica é um polinômio de segunda ordem, em coordenadas polares, que foi desenvolvido para se adequar à forma de 14 protótipos e 13 baías naturais.

$$R_N/R_0 = C_0 + C_1 (\beta/\theta_N) + C_2 (\beta/\theta_N)^2$$

Os principais parâmetros são o ângulo β (ângulo entre a direção de onda e a linha de controle, que liga o ponto de difração à região onde a praia começa a assumir uma tendência retilínea) e o comprimento R_0 (comprimento da linha de controle supracitada), como representado na Figura 80. A direção de onda é assumida como sendo a tangente à porção retilínea da costa. Cada comprimento R_N forma um ângulo θ_N com a crista da onda que difrata na ponta do promontório. As 3 constantes C são obtidas por regressão e variam em função de β . Os parâmetros da equação são apresentados na forma de razões adimensionais (*e.g.* R_N/R_0 , β/θ_N) para que a aplicação do modelo possa ser realizada independente da escala. O ponto de difração (P), mais simples de ser determinado, é definido como último ponto onde a ondulação incidente sofre difração antes de chegar à praia. O ponto de encerramento da influência do promontório na praia (E) é definido como sendo o início da porção retilínea da costa (quando ausente, é assumido como sendo o fim da praia) e a direção de onda (R) é definida como a tangente a esse ponto (à porção retilínea). Com a definição desses pontos, o modelo gera a forma em planta estável da praia, definida pela ação da direção de onda indicada, em condição de balanço sedimentar

nulo.

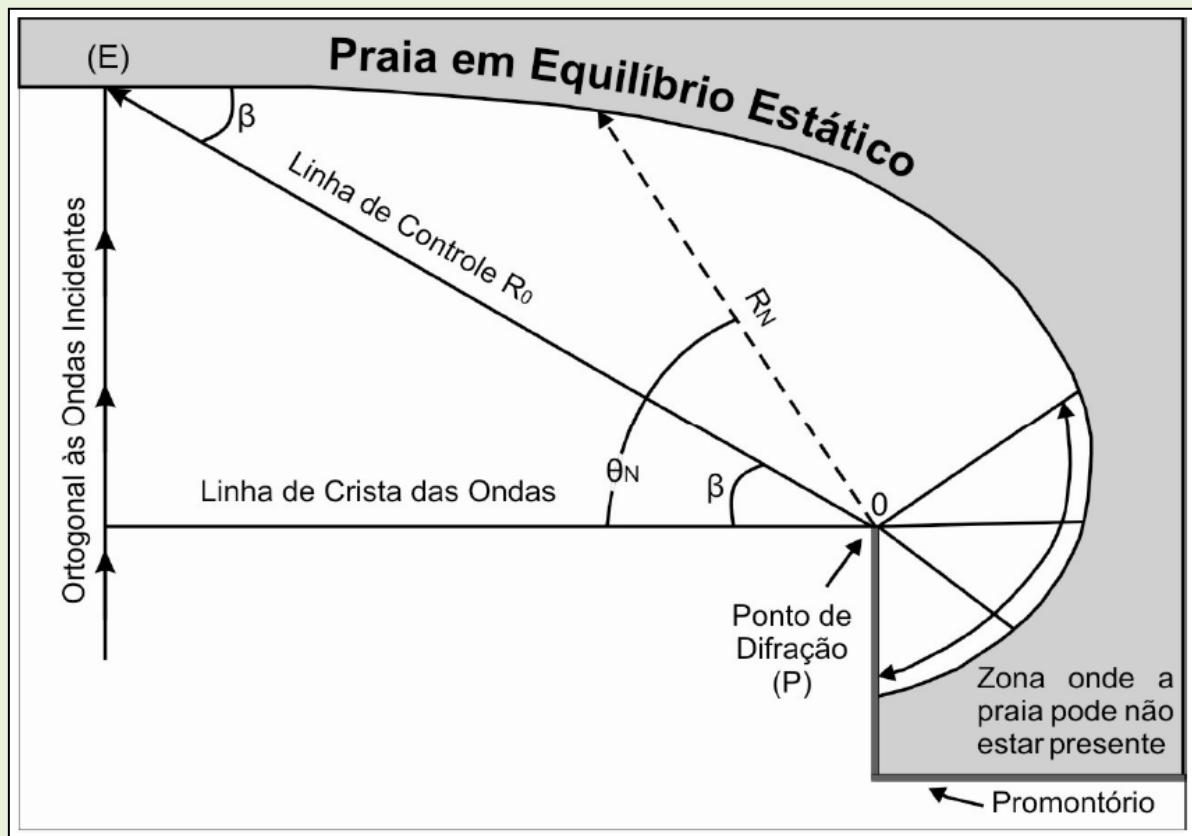


Figura 80. Desenho esquemático das variáveis da equação parabólica (modificado de Hsu e Evans, 1989).

O modelo parabólico assume algumas premissas básicas: (1) o modelo deve ser aplicado para costas dominadas por ondas; (2) o balanço sedimentar líquido deve ser nulo, sem transporte residual em nenhuma direção ao longo da costa; (3) a batimetria deve ser homogênea, sem a presença de lajes ou feições batimétricas que possam influenciar nos padrões de refração e difração e (4); a direção predominante das ondas deve ser perpendicular à orientação da porção retilínea da praia. Nos casos em que o modelo é aplicado e a forma gerada pela equação parabólica não corresponde à forma da praia, algum dos pressupostos do modelo foi quebrado e a praia é classificada como em equilíbrio dinâmico. A aplicação do modelo parabólico foi feita utilizando os *softwares* MEPBAY e SMC, conforme recomendado por RAABE *et al.* (2010).

O resultado obtido pelo modelo parabólico é apresentado na Figura 81.

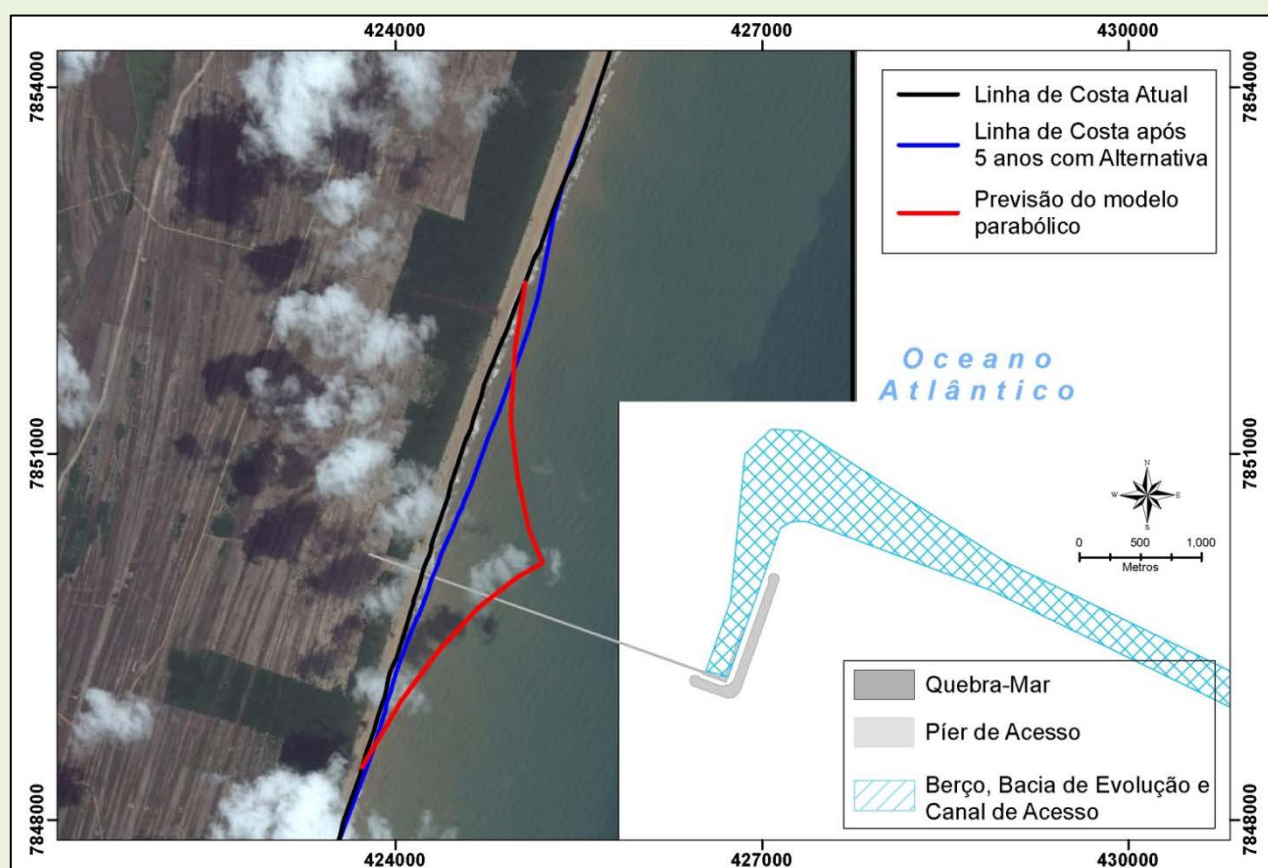


Figura 81. Previsão da linha de costa futura pelo modelo parabólico com a presença do quebra-mar.

De acordo com o resultado obtido pelo modelo morfológico após cinco anos de simulação com a estrutura (Figura 81, linha azul), houve um acúmulo de sedimentos corroborando com a previsão dos modelos analíticos de DALLY e POPE (1986) e AHRENS e COX (1990) (Tabela 14), com feição em forma de saliência pouco pronunciada à sem sinuosidade, caracterizando um resultado satisfatório e aceitável. Já o modelo parabólico de Hsu e Evans (1989) neste caso não deve ser aplicado, pois as premissas inerentes à sua metodologia não são atendidas na região de estudo. Além da praia de Cacimbas se encontrar em equilíbrio dinâmico, a região apresenta um transporte líquido anual de sedimentos elevado, a batimetria não é constante (presença do canal de navegação e bacia de evolução) e o próprio canal de navegação gera diversos pontos de difração das ondas ao longo de seu comprimento, impedindo a utilização desta metodologia para inferir a forma em planta da praia após sua estabilização.

5 Conclusões e Recomendações

Este estudo utilizou a modelagem numérica para avaliar a implantação do terminal portuário Manabi na praia de Cacimbas em Linhares/ES. Foram avaliados os impactos causados pelas estruturas de apoio ao terminal portuário (canal de navegação, bacia de evolução, berços, quebra-mar, píer de acesso) na circulação hidrodinâmica, propagação de ondas desde offshore até a praia, no transporte de sedimentos na evolução morfológica para 1 e 5 anos e estimativa de estabilização de linha de costa.

Os resultados mostraram que a propagação de ondas dos quadrantes simulados (N, NE, E, SE, S, SSW) sofrerá alteração pelas estruturas do terminal. As ondas com direção de propagação oblíqua ao quebra-mar e canal de navegação, sofrerão alterações com maior extensão, para as direções norte e sul. O setor central da praia de Cacimbas (sombreada pelo quebra-mar) passará a receber ondas com menor altura e mostrou uma tendência progratante da linha de costa. Regiões a norte e a sul do empreendimento apresentaram aumento da altura de ondas.

Alterações na hidrodinâmica foram observadas, com maior magnitude para situação de maré de sizígia. As correntes predominantes na região são decorrentes da propagação da onda de maré, com sentido norte/sul paralelas a linha de costa. Para todos os cinco casos simulados, as estruturas do terminal modificaram a circulação hidrodinâmica local, principalmente pela presença do quebra-mar. Na praia de Cacimbas, a alteração na circulação ocorre devido à mudança na altura e direção de propagação das ondas. O quebra-mar gera zonas de sombra no lado oposto do sentido da corrente, seguidos por vórtices com diâmetro de 700 metros de comprimento. A velocidade das correntes no canal de navegação é de cerca de 1,0 m/s (2 nós) em situações normais, com sentido transversal ao canal. Em casos extremos essa corrente transversal pode alcançar 3 nós (1,5 m/s).

O comportamento geral do transporte de sedimentos está associado ao clima de ondas atuante e ocorre preferencialmente na zona de surfe da praia de Cacimbas. O transporte resultante variou de acordo com o caso de onda simulado, com orientação para sul ou para norte. Os casos mais energéticos, representados pelas ondulações dos quadrantes leste e sul apresentaram valores de transporte de 2 a 3 m³/m/h na zona de surfe. O caso caracterizado como evento extremo ou tempestades, apresentou valor de transporte de sedimentos de até 16 m³/m/h na zona de surfe. Com a presença do quebra-mar, ocorreu uma diminuição no transporte de 2 m³/m/h na região sombreada pela estrutura.

O modelo de evolução morfológica foi simulado para as situações após 01 ano e 05 anos da implantação do terminal portuário. Foram identificados três setores na praia de Cacimbas que sofrerão impacto direto das estruturas do terminal portuário: setor norte, central e sul.

Após 5 anos de simulação, o setor norte foi caracterizado como erosivo, apresentando recuo da linha de costa de 62 metros, e variação negativa do volume relativo de 488 m³/m em média. O setor central, caracterizado como acrescivo, progradiu 210 metros em direção ao mar, obtendo uma variação volumétrica relativa positiva de 307 m³/m em média. O setor sul apresentou padrões levemente erosivo, com variação volumétrica relativa negativa de 41 m³/m em média. As simulações mostraram que o ambiente apresentará uma evolução contínua desde a implantação do terminal até 5 anos, com uma maior celeridade da evolução da morfologia da praia nos dois primeiros anos, tendendo a diminuir após este ano. A região do canal de navegação e quebra-mar também foi afetada. O padrão geral foi erosão do topo do talude no lado norte do canal de navegação e deposição da mesma magnitude na base do talude no lado sul do canal. O quebra-mar apresentou em suas três pontas (forma de L) tendência erosiva de 2 metros após cinco anos de simulação.

O transporte resultante de sedimentos após a implantação do terminal portuário, tanto nas simulações de 01 e 05 anos, manteve sentido sul para norte nos setores sul e central. No setor norte surgiu uma zona de reversão do transporte residual, com sentido norte para sul, devido à influência das estruturas (quebra-mar e canal de navegação). Esta zona de reversão faz com que o sedimento migre do setor norte para o setor central, favorecendo o acúmulo de sedimentos no setor central e a erosão no setor norte. Após o setor norte o transporte volta a ser sul para norte, sendo evidenciada uma zona de erosão onde há gradiente positivo de transporte.

No layout atual, as estruturas de apoio favorecem a formação de vórtices na bacia de evolução e correntes de través de 1 a 2 nós tanto na bacia de evolução como canal de acesso. Esta magnitude de correntes pode proporcionar perigos à navegação. Pelo ambiente em questão ser caracterizado como costa aberta aos processos oceanográficos, o clima de ondas local apresenta grandes ondas com longos períodos, associado a correntes longitudinais intensas, o que tende a dificultar a operação. Para isso é recomendada a aplicação de um modelo de agitação portuária (Boussinesq) para avaliar as taxas de operabilidade do terminal portuário, bem como realizar um estudo de navegabilidade com intuito de averiguar se o canal de navegação é adequado ao navio sob as diversas condições hidrodinâmicas, analisar a viabilidade das manobras na bacia de evolução, bem como das manobras de atracação e desatracação.

Avaliando a sedimentação ocorrida no canal de navegação, estimou-se o período de dragagem do canal baseado no tempo de operação do terminal em um ano. Sugere-se que o canal de navegação seja dragado a até cada 2 anos, para que não comprometa significativamente a operabilidade do terminal, compreendendo um volume aproximado de até 284.000 m³. Com relação à erosão causada na base do quebra-mar, sugere-se a utilização de alguma tecnologia como forma de mitigação deste processo, que alcançou erosão aproximada entre 4 e 5 metros em 5 anos.

A análise de estabilização da linha de costa pós-obra compreendeu um período de 30 anos. Foi observada uma área de erosão na porção norte da área de estudo e uma área de deposição na porção central (em frente ao futuro terminal). As maiores taxas de progradação ocorreram nos quatro primeiros anos (37,5 m/ano), havendo uma redução gradual nessa taxa até 14 anos, onde manteve-se constante com 12,5 m/ano até 30 anos. A retração da linha de costa na porção norte da área de estudo manteve-se em uma taxa constante entre 2 e 30 anos pós obra, erodindo 10 m/ano.

O modelo morfológico de estabilização da linha de costa foi considerado conservador, apontando máximos valores de erosão considerando uma costa totalmente arenosa e sem presença de vegetação. Após 30 anos, o setor central cresceu 480 metros e o setor norte erodiu 250 metros. Sugere-se o monitoramento da linha de costa por perfis topobatimétricos (porções aéreas e subaéreas da praia) durante e após a conclusão das obras. Caso ocorram diferenças excessivas com relação aos resultados apontados, o modelo numérico deve ser revisado e calibrado utilizando os dados medidos em campo pelo monitoramento.

Equipe Técnica

Nome	Formação	Função	CTF – IBAMA	CREA/ AOCEANO
Alex Vieira Falkenberg	Engenheiro de Controle e Automação	Gerente de Projeto	5132601	PR-68434/D
Morjana Signorini	Oceanógrafa	Modelagem Numérica	5121640	1928
Gustavo Hattenhauer Gomes	Oceanógrafo	Modelagem Numérica	5219554	1962
Patricia Roberta Puhl	Oceanógrafa	Modelagem Numérica	5782303	2129

6 Referências

- AHRENS, J. P. e COX, J. Design and Performance of Reef Breakwaters. Journal of Coastal Research, Vol. 6 (1), 1990. 61-75.
- 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.
- BENEDET, L. e LIST, J.H., 2008. Evaluation of the physical process controlling beach changes adjacent to nearshore dredge pits. Coastal Engineering, Volume 55 (12). 1224-1236.
- BITTENCOURT, A. C. S. P., DOMINGUEZ, J. M. L., MARTIN, L., SILVA, I. R., DE-MEDEIROS, K. O. P. Past and Current Sediment Dispersion Pattern Estimates Through Numerical Modeling of Wave Climate: an Example of the Holocene Delta of the Doce River, Espirito Santo, Brazil. An Acad Bras Cienc, Vol. 79(2), 2007. 333-341.
- DALLY, W. R. e POPE, J. Detached Breakwaters for Shore Protection. Technical Report CERC-86-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1986, Vicksburg, MS.
- 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.
- FEMAR, 2000. Catálogo de estações maregráficas brasileiras, Folhas 159 e 160. Disponível em: <http://www.fundacaofemar.org.br>. Acessado em: 22 mar. 2012.
- HALLERMEIER, R. J. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. Journal of Coastal Engineering, 4. 1981. 253/277.
- HANSON J. L., JENSEN, R. E. Wave System Diagnostics for Numerical Wave Models. Proceedings, 8th International workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, 2005.

HSU, J. R. C., BENEDET, L. B., KLEIN, A. H. F., RAABE, A. L. A., TSAI, C. P. e HSU, T. W. Appreciation of Static Bay Beach Concept for Coastal Management and Protection. Journal of Coastal Research, Vol. 23 (5), 2007.

HSU, J. R-C. e EVANS, C. Parabolic Bay Shapes and Applications. Proceedings of Institution of Civil Engineers – Part 2. 1989. London, Thomas Telford.

LESSER G.R., 2009. An approach to medium-term coastal morphological modelling. TU Delft. PhD Thesis.

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

Lomónaco, P. e Medina, R. 2005. Harbour And Inlet Navigation- Sedimentation Interference: Morphodynamics And Optimum Design. Canadian Coastal Conference 2005. Dartmouth.19 p.

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

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

PIANCA, C., MAZZINI, P.L.F., SIEGLE, E., 2010.Brazilian Offshore Wave Climate Based on NWW3 Reanalysis. Brazilian Journal of Oceanography, 58(1): 53-70.

POPE, J. e DEAN, J. L. Development of Design Criteria for Segmented Breakwaters. Proceeding, 20th International Conference Coastal Engineering, ASCE, NY, 1986. 2144-2158.

RAABE, A. L. A., KLEIN, A. H. F, GONZÁLEZ, M. e MEDINA, R. MEPBAY and SMC: Software tools to support different operational levels of headland-bay beach in coastal engineering projects. Coastal Engineering, Vol. 57, 2010. 213-226.

RIS, R.C., N. BOOIJ AND L.H. HOLTHUIJSEN, 1999. A third-generation wave model for coastal regions, Part II, Verification, J.Geoph.Research C4, 104, 7649-7666.

TOLMAN , H. L, 1997: User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.15. NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 151, 97 pp.

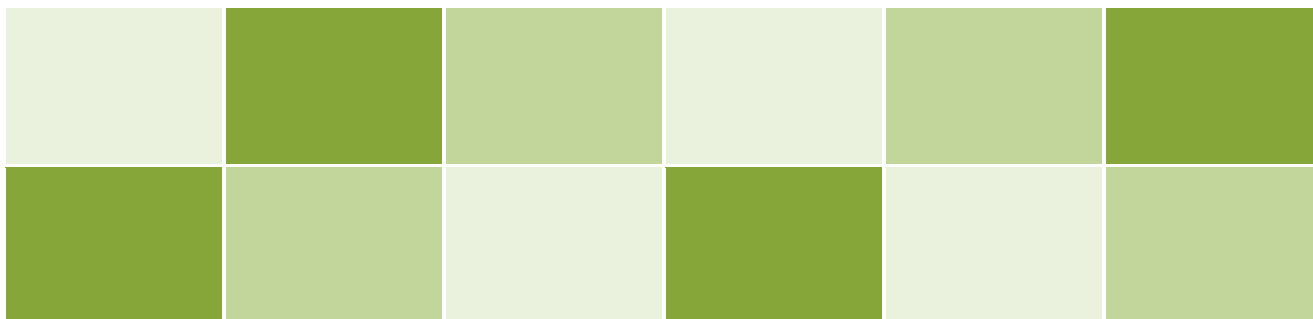
TOLMAN , H. L, 1999: User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18. NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 166 , 110 pp.

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

WL | DELFT HYDRAULICS. 1999. Modification First-Guess SWAN and Bench Mark Tests for SWAN: Report no. H3515, Delft.

WL | DELFT HYDRAULICS. 2000. Physical Formulations SWAN and Data for Validation: n: Report no. H3528, Delft.

Modelagem Numérica do Transporte e Dispersão de Óleo no Mar para Derramamentos Hipotéticos no Porto Norte Capixaba da Manabi em Linhares - ES



Relatório Técnico – RT-ECV-006/13
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 circulação hidrodinâmica e dispersão de óleo em Linhares – ES. O estudo teve o objetivo de avaliar os impactos gerados por um vazamento de óleo hipotético nas proximidades do Porto Norte Capixaba da Manabi Mineração, considerando o Porto Norte Capixaba localizado a 2500 m de distância da praia.

As simulações foram conduzidas de acordo com os critérios estabelecidos na Resolução CONAMA nº398/2001, que define 3 (três) classes de derramamento: pequeno, com um volume de até 8 m³; médio, com até 200 m³ e de pior caso, definido de acordo com as características das operações, podendo ser o rompimento do mangote, afundamento da embarcação ou perda de controle do poço (quando aplicável). O volume de pior cenário considerado foi de 5600 m³, sendo este correspondente ao afundamento e vazamento de toda capacidade de armazenamento do tanque da maior embarcação de projeto (Cape Size – 300 m). O óleo simulado foi o BUNKER C e o local de vazamento definido foi na região interna do porto por estar mais próximo da costa e com maior probabilidade de vazamentos pela presença da estrutura de abrigo.

As simulações foram conduzidas em modo probabilístico e determinístico, considerando os meses de verão e inverno e suas variabilidades meteorológicas e oceanográficas. Com o objetivo de se prever o pior cenário possível, não foi considerado qualquer sistema de controle ou ação de resposta aos vazamentos nas simulações, tais como uso de barreiras de contenção, *skimmers* e dispersantes.

Para a geração das bases hidrodinâmicas representativas dos meses de verão e inverno foi utilizado o modelo numérico Delft-3D, desenvolvido pela Deltares (Delft Hydraulics - Holanda) e considerado a ferramenta mais avançada na atualidade para simulações de ambientes costeiros, estuarinos e fluviais. Para a simulação dos processos de dispersão foi utilizado o *Oil Spill Information System* OSIS, modelo lagrangeano que calcula os processos advectivos e dispersivos de vários tipos de óleos derramados no mar.

Para o período de inverno, de uma maneira geral, para todos os volumes de vazamento a mancha de probabilidade se apresentou bastante similar, indicando, independentemente do volume de vazamento, a tendência de dispersão da mancha de óleo latitudinalmente. Para Norte, a mancha de probabilidade chega a aproximadamente 140 km, para Sul chega a 135 km, já em direção ao mar a mancha não chega a 10 km (na latitude do lançamento). Em função da entrada de frentes frias, com ventos em geral de Sul e Sudeste, nota-se que as maiores probabilidades de presença do óleo estão diretamente a Norte do empreendimento, principalmente próximos à costa, isso ocorre devido à orientação da costa e aos ventos de Sul/Sudeste que transportam o óleo para a praia. Ainda para o Norte, as manchas podem chegar a vários quilômetros do empreendimento, porém, a probabilidade de ocorrência é bastante baixa (<10%). Sob influência de ventos e correntes do sentido Norte-Sul, a mancha de probabilidade se espalha também longitudinalmente. Ao Sul do Rio Doce ocorre uma reorientação da linha de costa, e juntamente com a barreira hidráulica imposta pelo próprio Rio Doce, a probabilidade de toque do óleo na costa torna-se bastante reduzida.

As manchas de probabilidade para os volumes simulados para o período de verão foram bastante similares ao de inverno em função da grande persistência do Bunker C na água. Durante o verão, as manchas de probabilidade chegam a aproximadamente 40 km para o Norte e 80 para o Sul. Na latitude do vazamento a largura da mancha é inferior a 10 km. Entretanto, no sentido Norte, observa-se que a mancha de probabilidade que toca a costa não ultrapassa 20 km, e a probabilidade é bastante baixa (<5%) para todos os volumes de vazamento. Em função da maior frequência de ventos nordeste no verão, a mancha de probabilidade se estende para Sul do Rio Doce, com probabilidade de cerca de 30% até pouco mais de 30 km ao sul do Rio. Entre o Rio Doce e o empreendimento, são encontradas as maiores probabilidades de dispersão de óleo próxima à costa (entre 30 e 75%).

A partir dos modelos probabilísticos, foram selecionados dois piores casos para a simulação determinística, um para o período de inverno e outro para o verão. No cenário de verão, o vento Nordeste transporta o óleo diretamente para a praia, sendo que em 8 horas a quantidade de óleo na água já é insignificante (a maior parte do óleo está na costa). No cenário de inverno a mancha de óleo se espalha na direção Sul, chegando a cerca de 60 km do terminal e, com a mudança das condições meteorológicas, por volta das 30 horas após o vazamento o óleo passa a migrar em direção à costa, atingindo as praias próximas à desembocadura do Rio Doce. É importante perceber que apenas pequena quantidade do óleo penetra no rio devido à descarga hídrica que se dá no sentido contrário. O rio atua protegendo a porção de praia ao norte de sua desembocadura, afastando as partículas de óleo da costa.

Os resultados da evolução do derramamento de óleo ao longo do tempo para os cenários de inverno e verão mostram que, embora no cenário de inverno o óleo tenha atingido uma área maior, o volume de óleo que chega à costa é bastante inferior (2000 m³ a menos) ao volume que chega à praia no pior cenário de verão. Isso se deve ao fato de que, na simulação de inverno o óleo fica mais tempo na água (cerca de 60 horas) em relação à simulação de verão (8 horas), o que permite que um maior volume de óleo seja disperso e evaporado.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 DESCRIÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	8
2 CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA E OCEANOGRÁFICA	10
2.1 REGIME DE VENTOS	10
2.2 MARÉS	14
2.2.1 BANCO DE ABROLHOS E PROPAGAÇÃO DA ONDA DE MARÉ	15
3 MODELO NUMÉRICO HIDRODINÂMICO	18
3.1 MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D-FLOW	18
3.2 GRADE NUMÉRICA	18
3.3 BATIMETRIA	19
3.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO	23
3.5 CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	25
3.6 BASES HIDRODINÂMICAS DE VERÃO E INVERNO	28
4 MODELAGEM DE DERRAMAMENTO DE ÓLEO	37
4.1 DADOS DE ENTRADA	40
4.2 PONTO DE RISCO E VOLUMES	41
4.3 CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO SELECIONADO	42
4.4 CRITÉRIO DE PARADA ADOTADO NAS SIMULAÇÕES	43
4.5 SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS.....	43
4.6 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS DE DERRAME DE ÓLEO	44
4.7 SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS	51
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55
6 REFERÊNCIAS.....	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo.	9
Figura 2: Localização do ponto (* branco) para o qual foi extraída a série temporal de ventos.....	11
Figura 3 Rosa de ventos gerada a partir dos dados do modelo CFSR na coordenada 39°15' O, 19°15' S, para o período entre 2001 e 2012.....	12
Figura 4 Constantes de Maré para a estação maregráfica de Barra do Rio Doce - ES.	14
Figura 5: Séries de maré reconstruídas a partir das principais constantes harmonicas da FEMAR para Mucuri e Barra do Rio Doce.	15
Figura 6: Calibração de nível do modelo do Banco de Abrolhos.	16
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.	16
Figura 8: Dados medidos em campo de nível e componente 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.....	17
Figura 9: Grade numérica criada para resolver os processos hidrodinâmicos da área de estudo.	19
Figura 10 Cartas náuticas utilizadas para digitalização dos valores de profundidade. Cartas (a) 70, (b) 1400, (c) 22800, (d) 1420.	20
Figura 11: Pontos de batimetria obtidos pelos levantamentos batimétricos efetuados nas proximidades do futuro Porto Norte Capixaba – Linhares - ES. Batimetria composta por levantamento cedido pela empresa Econservation e levantamento efetuado pela Shaw Brasil (dados referenciados verticalmente ao nível zero DHN).....	21
Figura 12: Batimetria interpolada e projetada na grade numérica do modelo (dados referenciados verticalmente ao nível médio do mar – N.M.).	22
Figura 13: Calibração do modelo hidrodinâmico correntes e nível.....	27
Figura 14: Rosa de ventos gerada com os dados provenientes do NCEP (CFSR) para o período de verão (19,417° S, 39,15° O).	28
Figura 15: Rosa de ventos gerada com os dados provenientes do NOAA/NCEP para o período de inverno, utilizando dados de maio a agosto de 2010 (19,417° S, 39,15° O).....	29
Figura 16: Direção e intensidades dos dados de vento do NCEP/NOAA extraídos para a região de estudo para o ano de 2011 (bloco laranja indica os meses de verão).....	30
Figura 17: Direção e intensidades dos dados de vento do NCEP/NOAA extraídos para a região de estudo para o ano de 2012 (bloco laranja indica os meses de verão e bloco azul indica os meses de inverno).	31

Figura 18: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no inverno com vento Sudeste e maré enchente de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.	32
Figura 19: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no inverno com vento Sudeste e maré vazante de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.	33
Figura 20: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no verão com vento Nordeste e maré enchente de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.	33
Figura 21: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no verão com vento Nordeste e maré vazante de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.	34
Figura 22: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no inverno com vento Sul e maré enchente de quadratura. O ponto vermelho representa o local onde a série de nível apresentada foi obtida e corresponde a região protegida do TP Manabi.....	34
Figura 23: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no inverno com vento Sul e maré vazante de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.	35
Figura 24: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no verão com vento Norte e maré enchente de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.	35
Figura 25: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no verão com vento Norte e maré vazante de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.	36
Figura 26: Localização do ponto de risco selecionado no Porto Norte Capixaba.	42
Figura 27: Probabilidade de alcance do óleo na água para um vazamento hipotético de 8 m ³ de Bunker C durante os meses de inverno.	45
Figura 28: Probabilidade de alcance do óleo na água para um vazamento hipotético de 200 m ³ de Bunker C, durante os meses de inverno.	46
Figura 29: Probabilidade de alcance do óleo na água para um vazamento hipotético de 5600m ³ litros de Bunker C durante os meses de inverno.	47
Figura 30: Probabilidade de alcance do óleo na água para um vazamento hipotético de 8m ³ de Bunker C, durante os meses de verão.	48

Figura 31: Probabilidade de alcance do óleo na água para um vazamento hipotético de 200m ³ de Bunker C, durante os meses de verão.	49
Figura 32: Probabilidade de alcance do óleo na água para um vazamento hipotético de 5.600m ³ de Bunker C, durante os meses de verão.	50
Figura 33: Inverno - Dispersão das partículas na simulação determinística de pior caso de verão.	52
Figura 34: Verão— Dispersão das partículas na simulação determinística de pior caso de inverno.	53
Figura 35: Verão – Balanço de massa para o cenário de pior caso de verão.	54
Figura 36: Inverno - Balanço de massa para o cenário de pior caso de inverno.	54

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.	15
Tabela 2: Cartas náuticas utilizadas e suas escalas.	20
Tabela 3: Estações aplicadas no presente estudo.	24
Tabela 4: Médias mensais de longo período, desvio padrão e coeficiente de variação. Em laranja os dados utilizados para os meses de verão, em azul, os dados de inverno.	25
Tabela 5: Parâmetros de calibração do modelo hidrodinâmico.	26
Tabela 6: Características do óleo combustível marítimo Bunker C. Modificado de Petrobras (2011).	43
Tabela 7: Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derrames de óleo.	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Diagrama de distribuição conjunta de intensidade e direção dos ventos (janeiro de 2001 a outubro de 2012) – convenção meteorológica.	13
Quadro 2: Componentes harmônicas de maré utilizadas.	24

1 Introdução

A CB&I foi solicitada pela Econservation Estudos e Projetos Ambientais a realizar um estudo de modelagem numérica da circulação hidrodinâmica e dispersão de óleo em Linhares – ES. O estudo tem o objetivo de avaliar os impactos gerados por um vazamento hipotético de óleo ocorrido nas proximidades do Porto Norte Capixaba da Manabi Mineração, localizado a 2500 m de distância da costa.

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. Na zona de surfe os sedimentos são predominantemente arenosos.

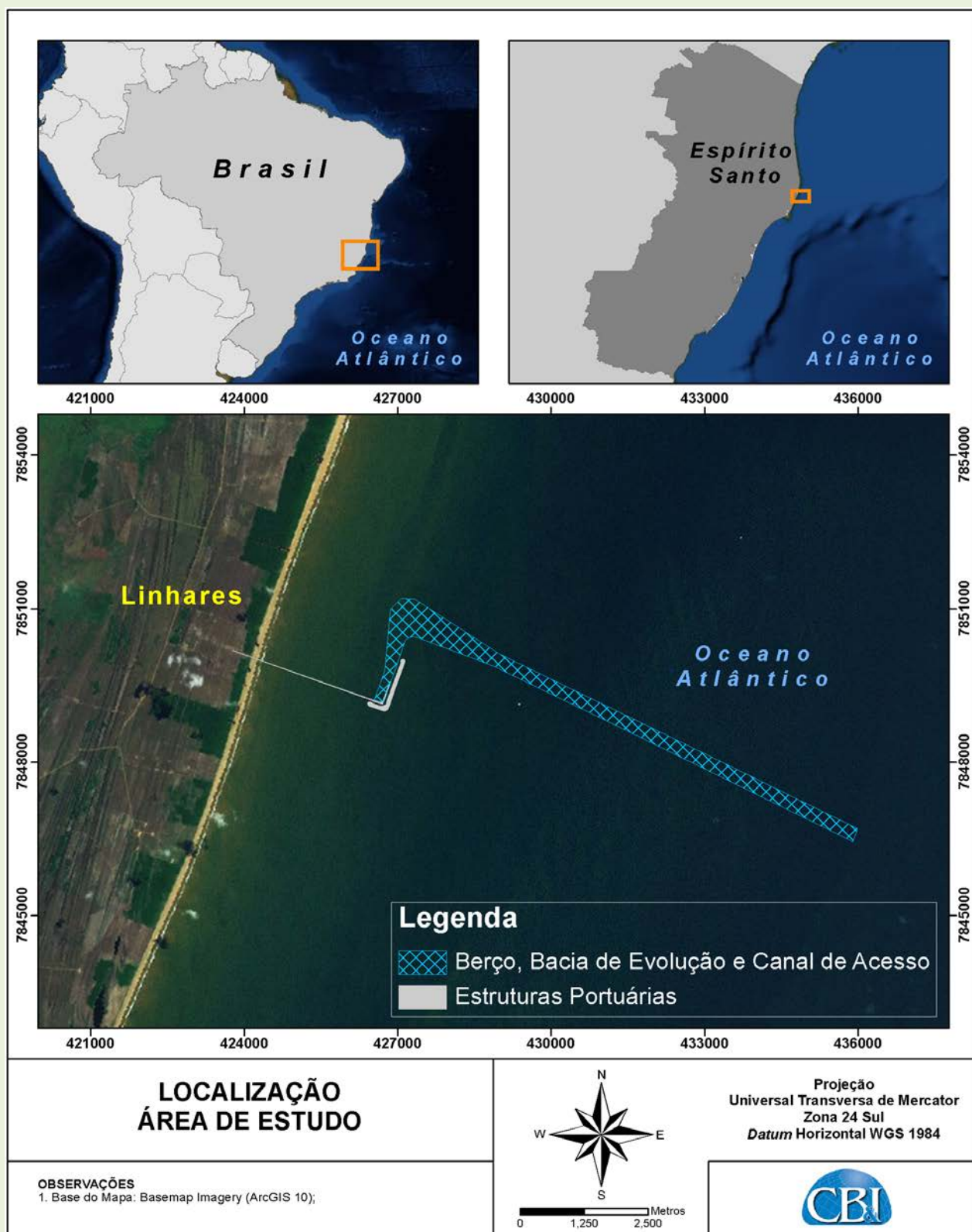


Figura 1: Localização da área de estudo.

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°15' O, 19°15' S (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).

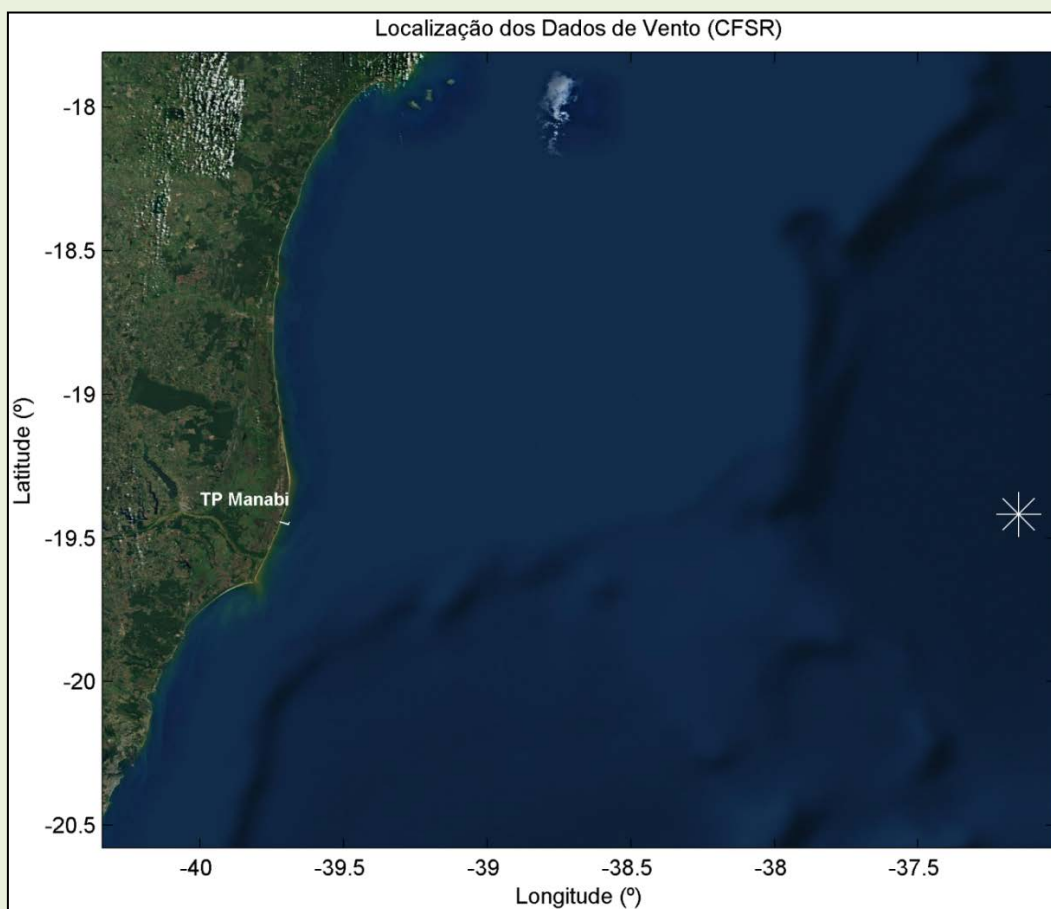


Figura 2: Localização do ponto (* branco) para o qual foi extraída a série temporal de ventos.

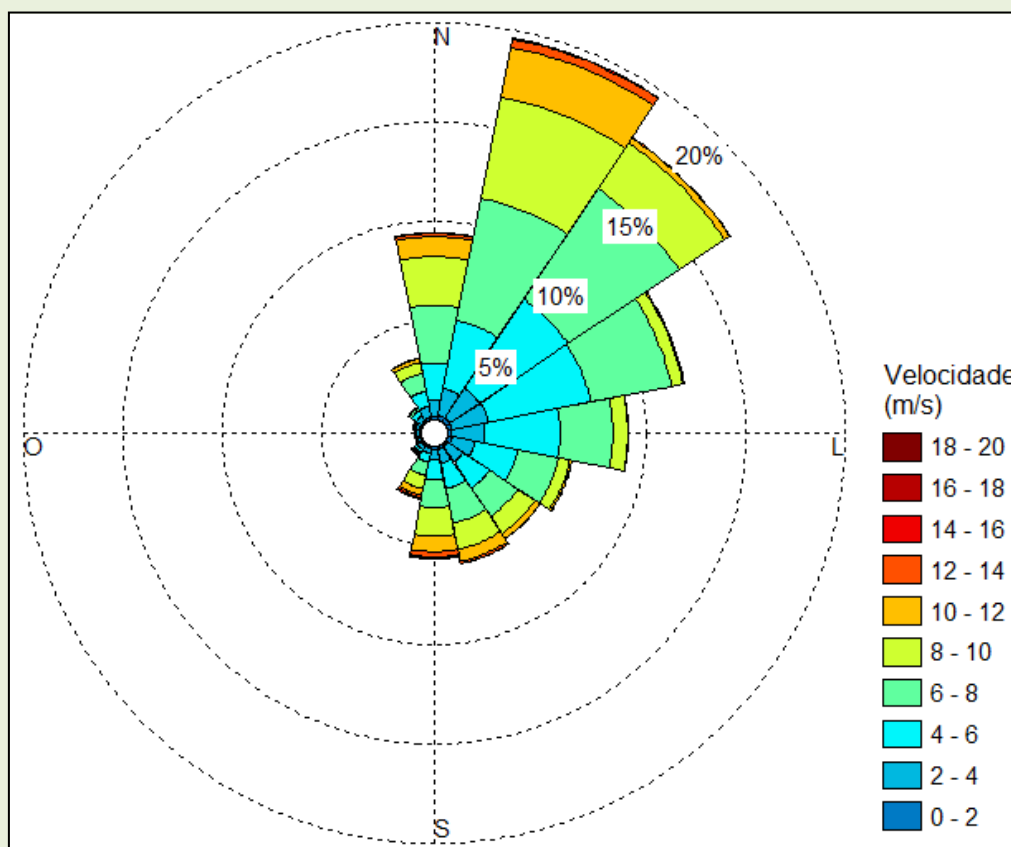


Figura 3 Rosa de ventos gerada a partir dos dados do modelo CFSR na coordenada 39°15' O, 19°15' S, para o período entre 2001 e 2012.

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 as médias 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 entre o litoral do Espírito Santo e litoral Sul da Bahia apresenta recortes diferentes de qualquer outro local no litoral brasileiro em função da presença do 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 onda de maré. Estes efeitos estão registrados nas fichas das estações maregráficas disponibilizadas pelo instituto FEMAR para Mucuri (região central do banco) e Barra do rio Doce (extremo Sul), apresentados na Tabela 1. 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

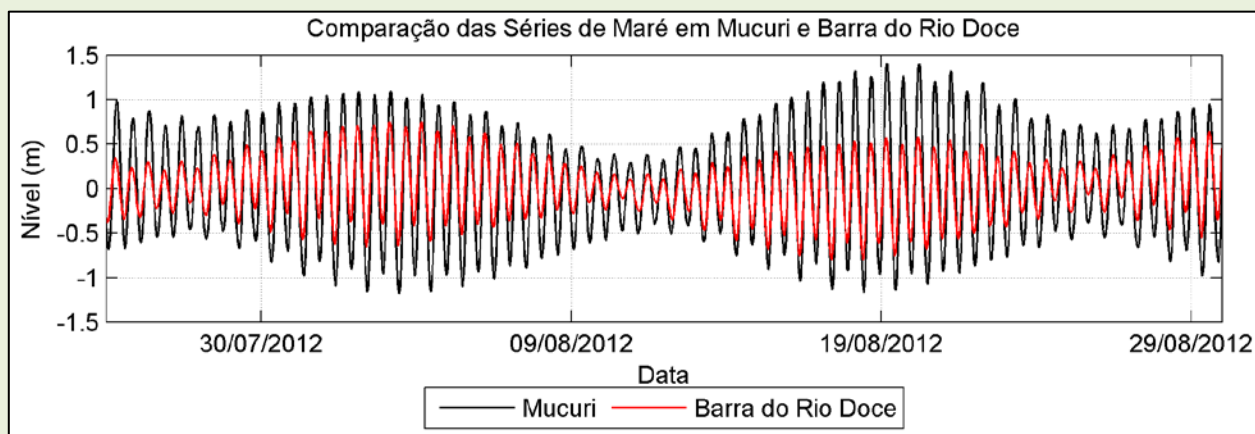


Figura 5: Séries de maré reconstruídas a partir das principais constantes harmônicas da FEMAR para Mucuri e Barra do Rio Doce.

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 lâmina d'água 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.

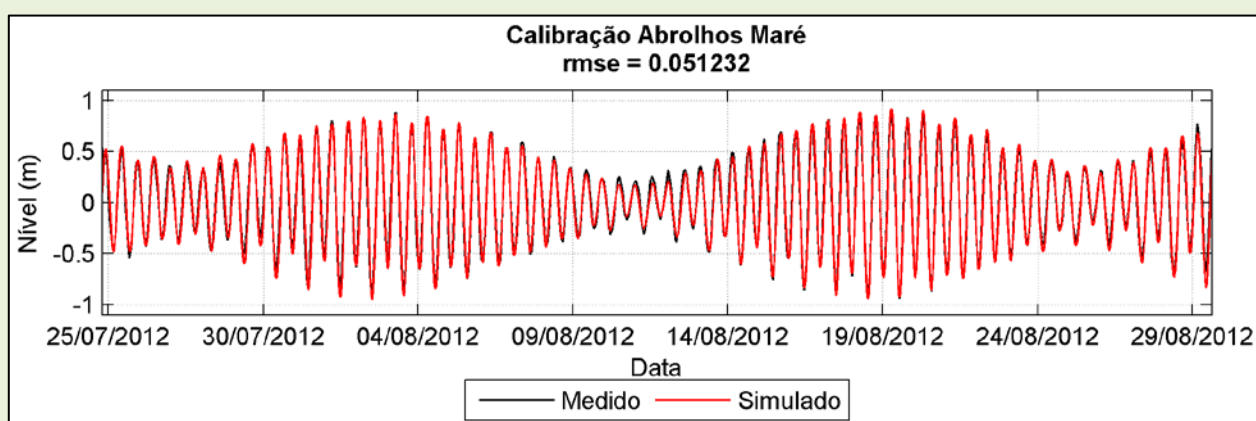


Figura 6: Calibração de nível do modelo do Banco de Abrolhos.

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.

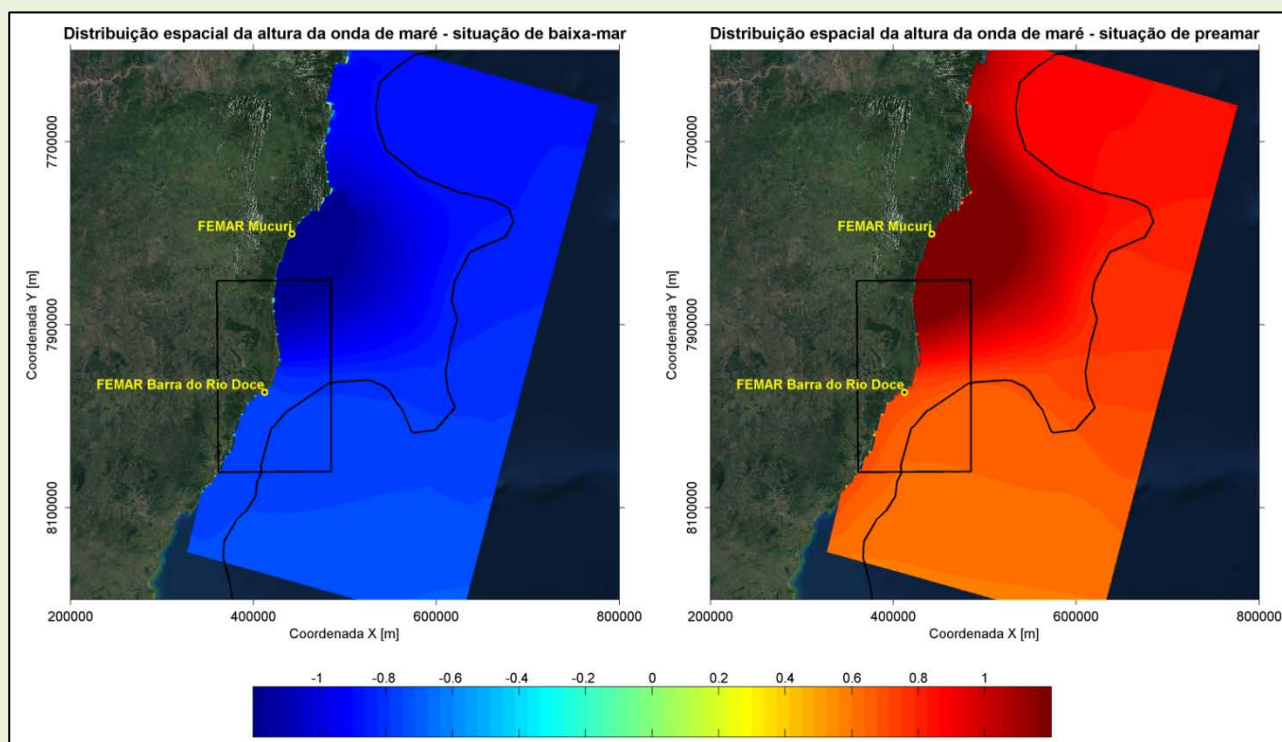


Figura 7: Variação espacial do nível de água na região do banco de Abrolhos. (A) Situação de baixa-mar, (B) Situação de preamar. As linhas pretas representam os limites do Banco de Abrolhos e a grade hidrodinâmica utilizada no modelo Delft3D.

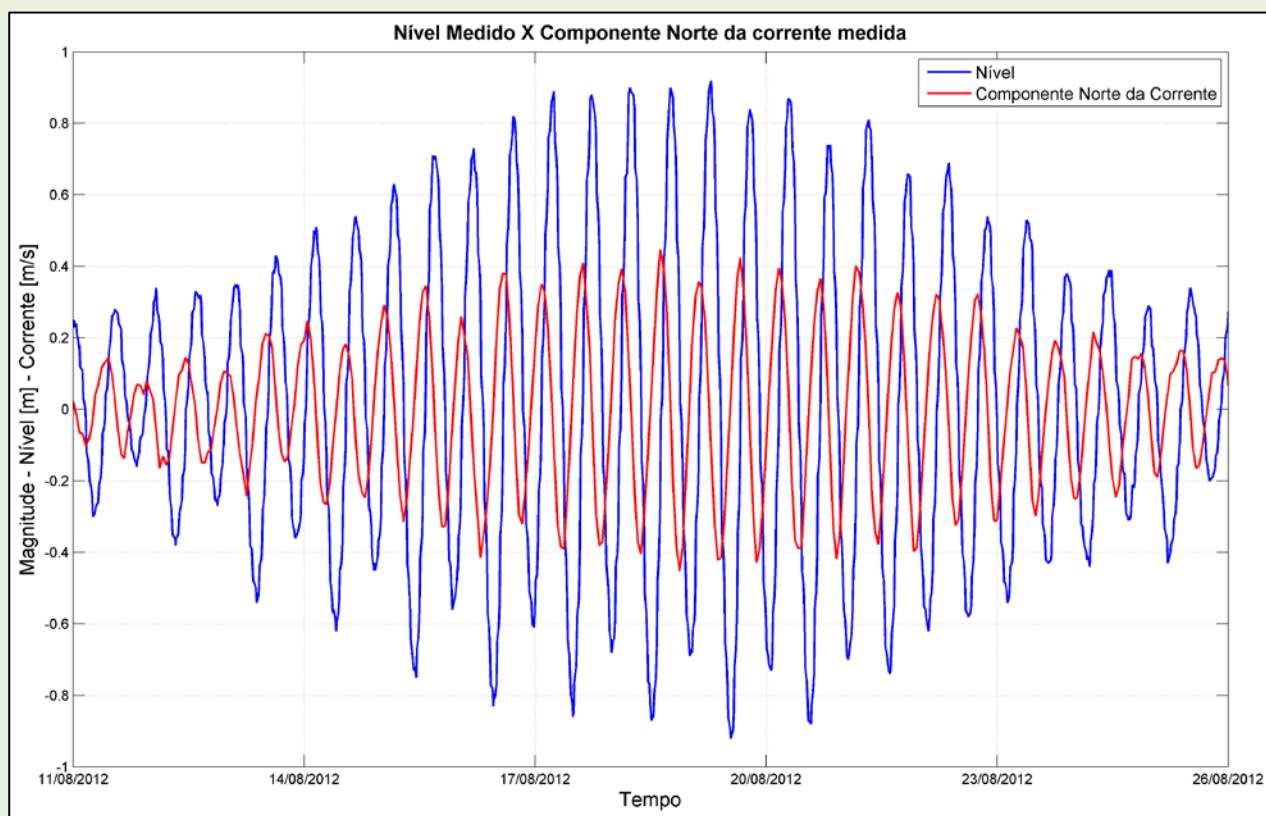


Figura 8: Dados medidos em campo de nível e componente norte da corrente. Exemplo da variação da corrente com período mareal, demonstrando que a corrente presente na região está associada principalmente à corrente de maré.

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) ou 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 quantidade de movimento é reduzida à relação da pressão hidrostática e as acelerações verticais são assumidas como sendo muito 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 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 Porto Norte Capixaba Manabi, em Linhares. A grade numérica possui maior refinamento na região do futuro Porto Norte Capixaba e do Rio Doce, de modo a representar de maneira satisfatória os processos hidrodinâmicos destas áreas (Figura 9).

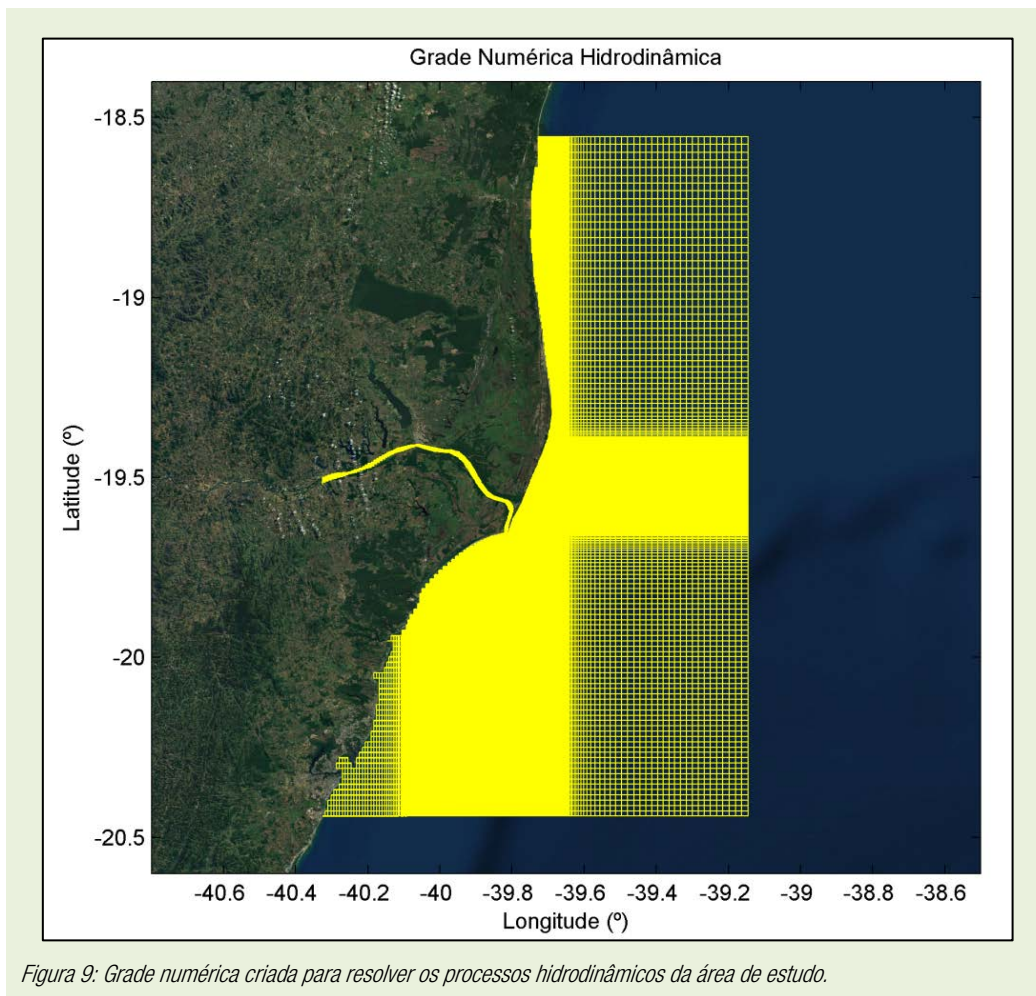


Figura 9: Grade numérica criada para resolver os processos hidrodinâmicos da área de estudo.

Composta por 368 x 303 elementos de cálculo (nós), a grade numérica apresenta espaçamento variável. Na região do Porto Norte Capixaba e do rio Doce o espaçamento é de 150 m e a 1700 m (nas regiões mais distantes da área de interesse).

3.3 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 10 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.

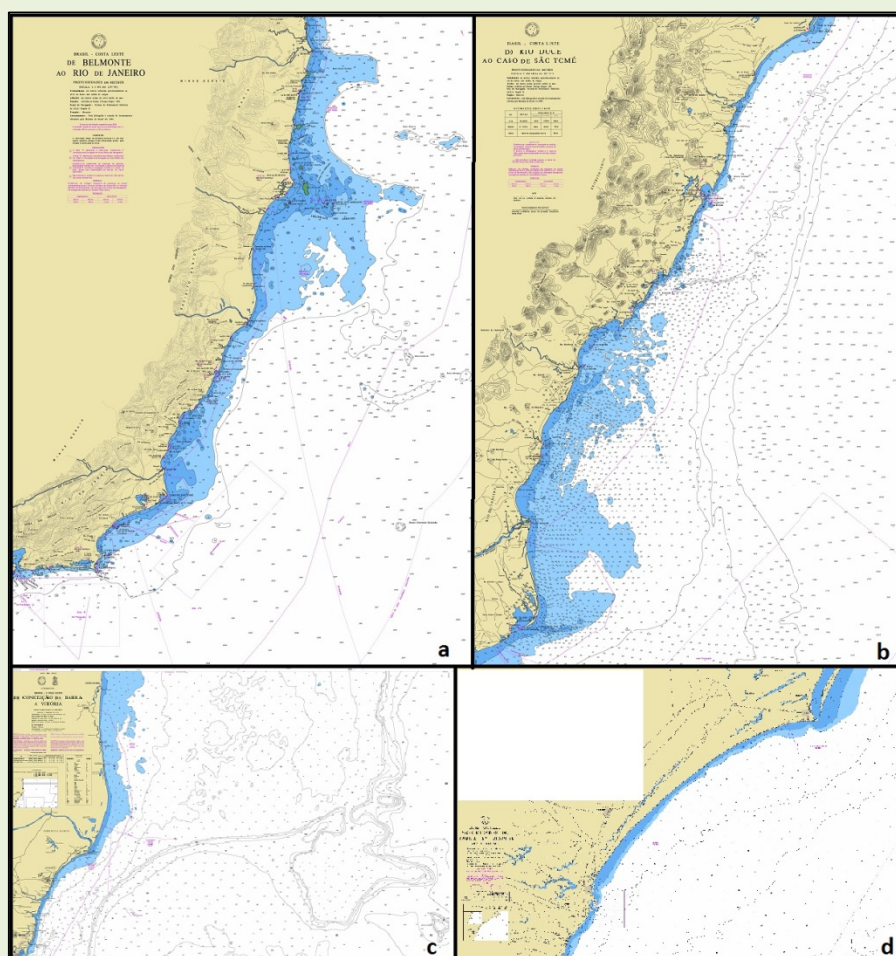


Figura 10 Cartas náuticas utilizadas para digitalização dos valores de profundidade. Cartas (a) 70, (b) 1400, (c) 22800, (d) 1420.

Tabela 2: Cartas náuticas utilizadas e suas escalas.

CARTA NÁUTICA	NÚMERO	ESCALA
De Belmonte 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 Porto Norte Capixaba são apresentados na Figura 11.

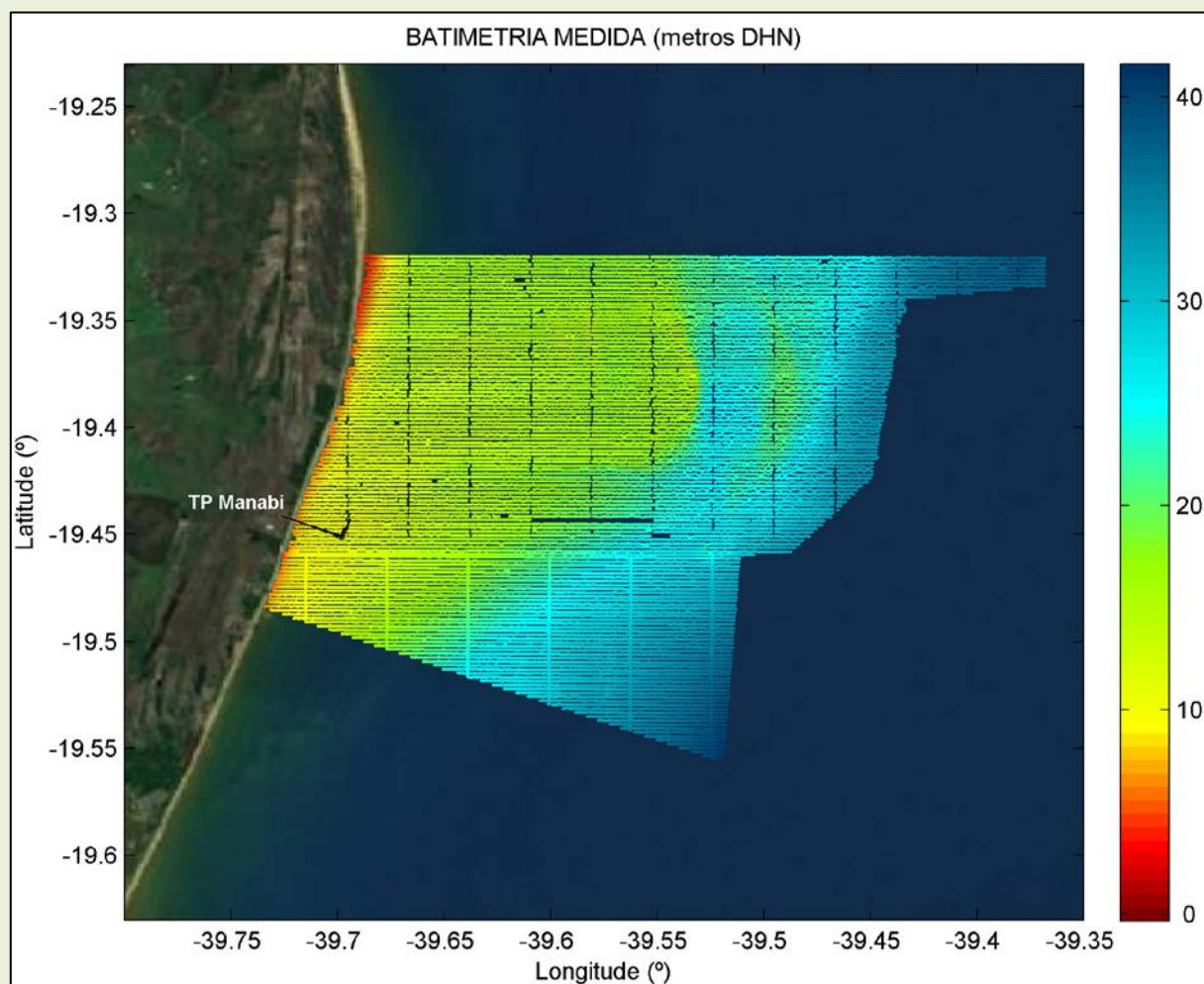


Figura 11: Pontos de batimetria obtidos pelos levantamentos batimétricos efetuados nas proximidades do futuro Porto Norte Capixaba – Linhares - ES. Batimetria composta por levantamento cedido pela empresa Econservation e levantamento efetuado pela Shaw Brasil (dados referenciados verticalmente ao nível zero DHN).

Os dados batimétricos das cartas náuticas e medidos foram combinados, rebatidos para o 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 12.

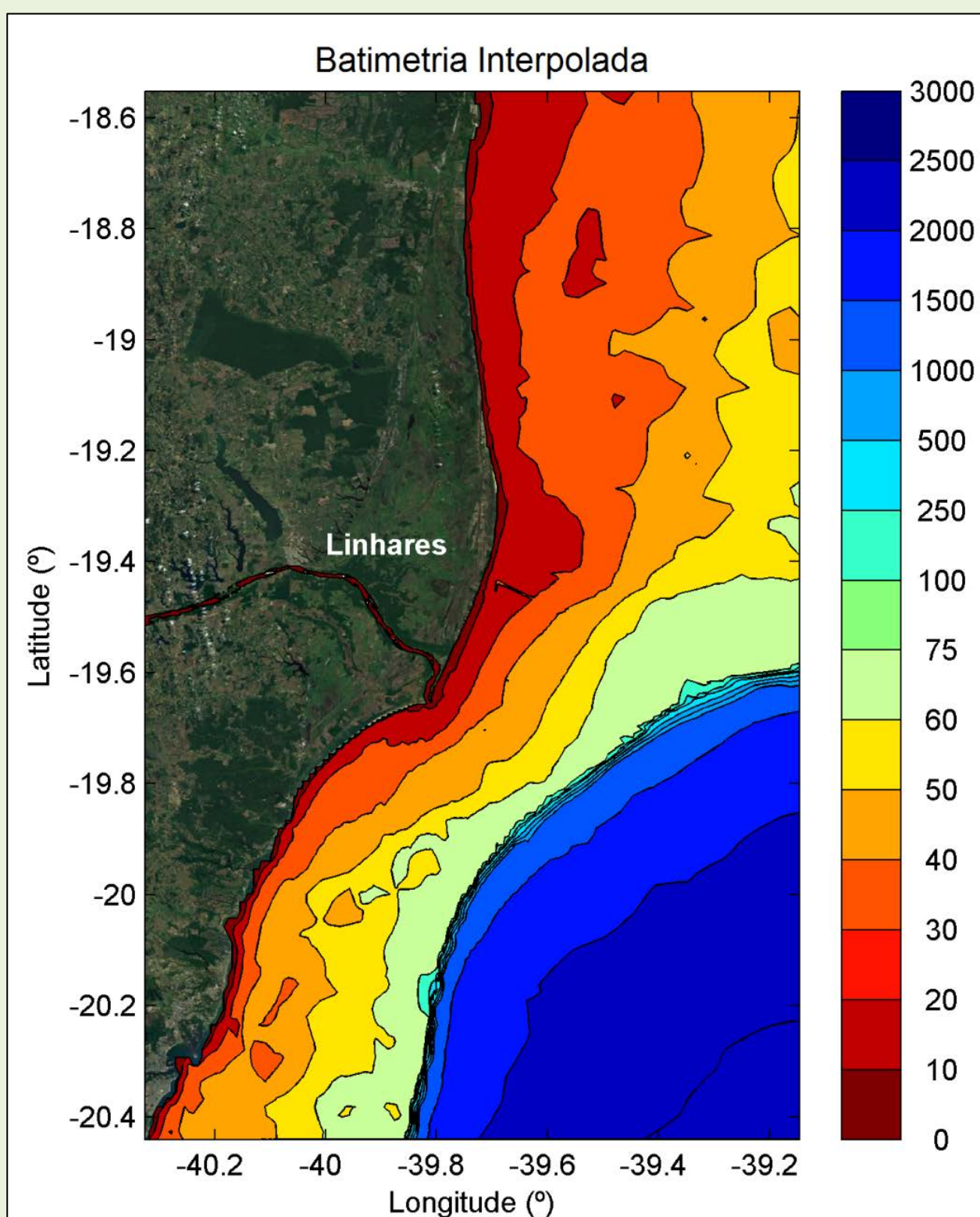


Figura 12: Batimetria interpolada e projetada na grade numérica do modelo (dados referenciados verticalmente ao nível médio do mar – N.M.).

3.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para a geração da base hidrodinâmica foram utilizados dados de elevação de nível d'água, vazão do rio Doce e ventos representativos da região de estudo.

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 Quadro 2. 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 este 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

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 ficou igual a 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. A 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. Em laranja os dados utilizados para os meses de verão, em azul, os dados de inverno.

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
Maió	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 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 13. 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 de 0,05 m/s e 0,14 m/s para as correntes nas componentes dos eixos x e y, respectivamente, e de 0,05 m para elevação de nível.

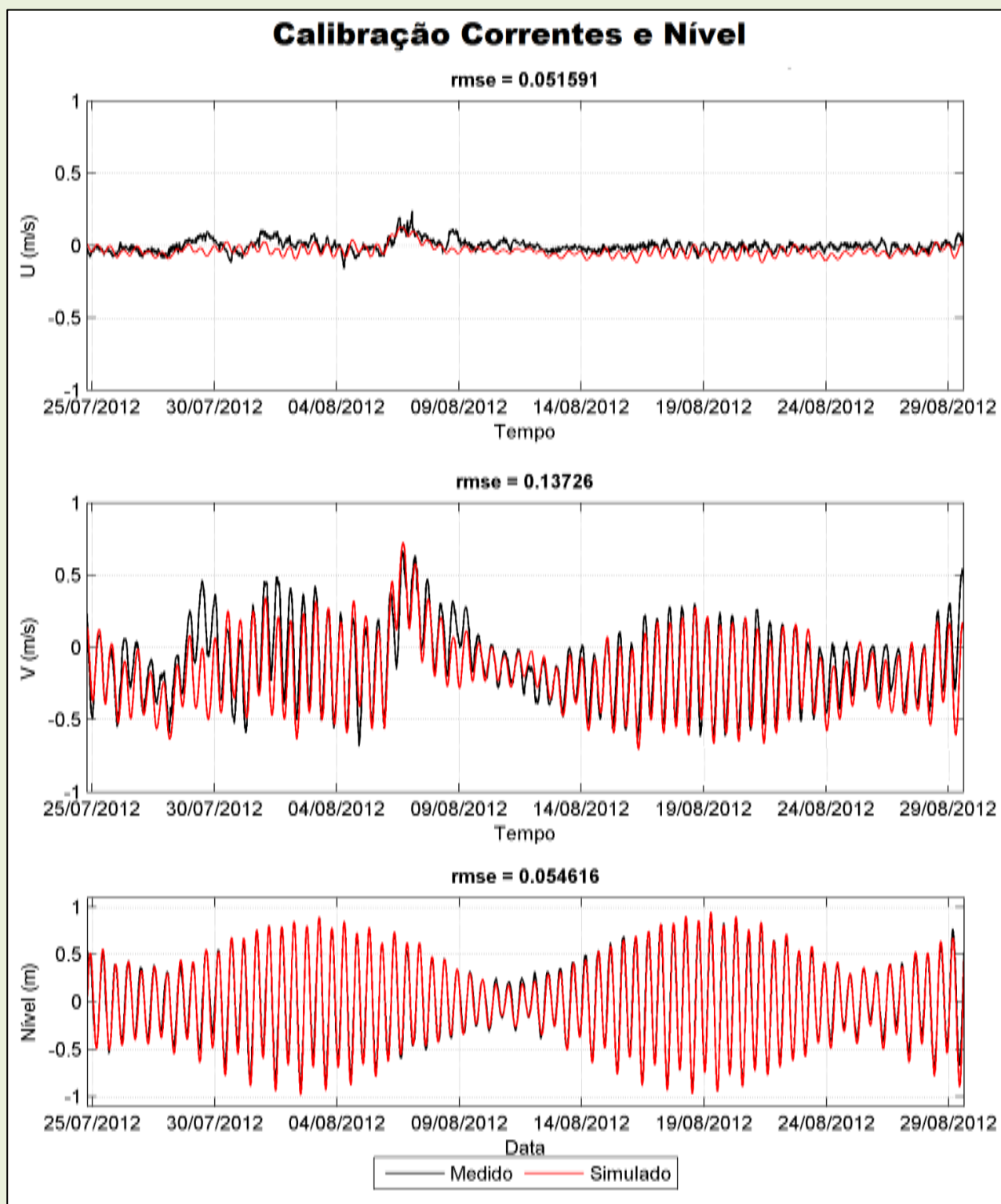


Figura 13: Calibração do modelo hidrodinâmico correntes e nível.

3.6 BASES HIDRODINÂMICAS DE VERÃO E INVERNO

Para as simulações de vazamento de óleo em modo probabilístico foram geradas duas bases hidrodinâmicas distintas utilizando o modelo numérico Delft3D. Cada uma das bases corresponde a quatro meses de simulação representando os períodos de inverno e verão. As bases foram geradas a partir dos dados de nível d'água, vazão do rio Doce e ventos descritos acima.

A base hidrodinâmica de verão compreende os meses de janeiro a março de 2012 do NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSR). Durante esse período, os ventos vindos dos quadrantes Nordeste são mais frequentes (Albino e Suguio, 2010). A rosa dos ventos referente à região do vazamento é apresentada na Figura 14.

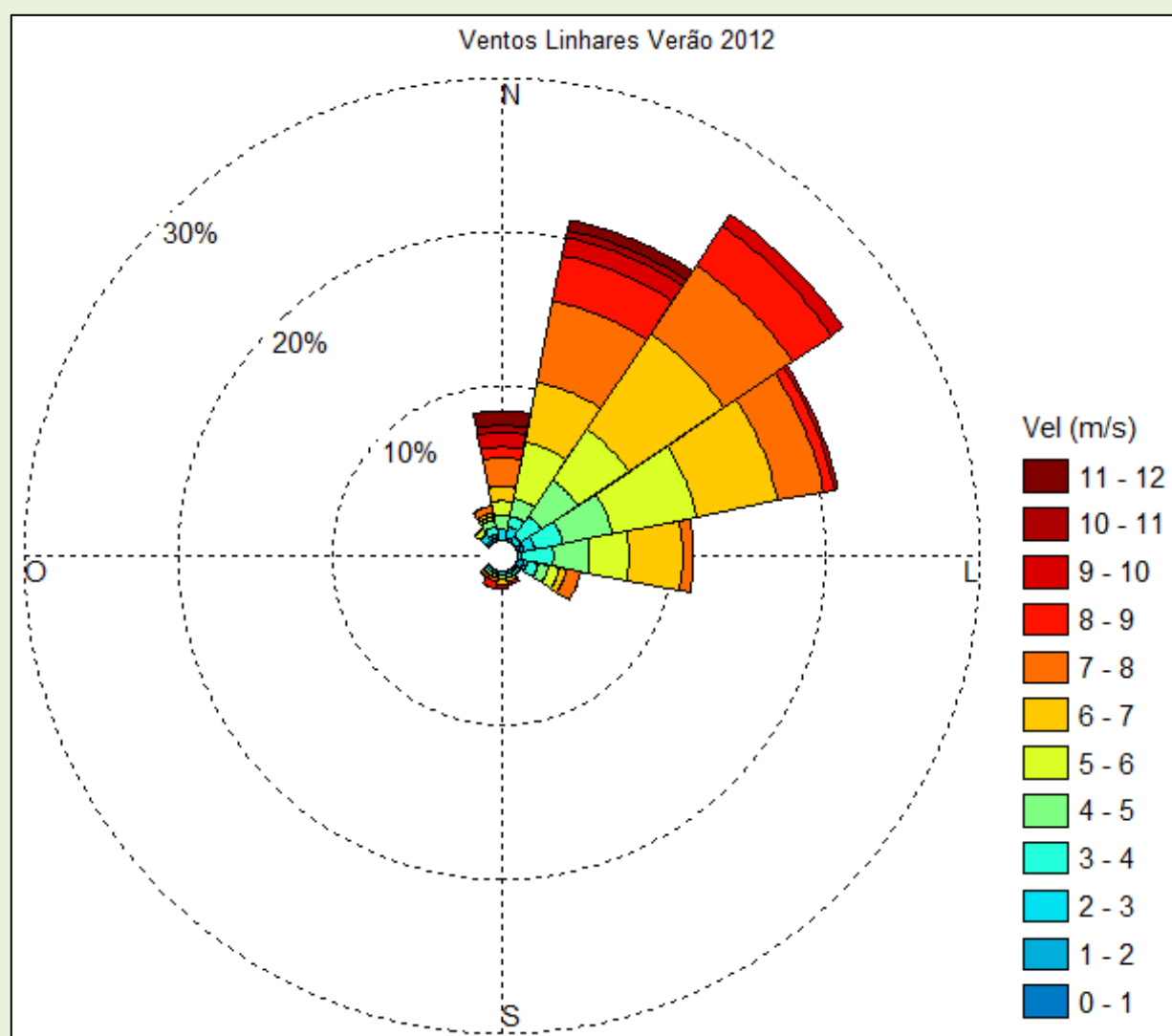


Figura 14: Rosa de ventos gerada com os dados provenientes do NCEP (CFSR) para o período de verão (19,417° S, 39,15° O).

A base hidrodinâmica de inverno compreende os meses de julho a setembro 2011. Durante esse período os ventos mais frequentes variam entre Nordeste e Sudeste. Sob influência de frentes frias, os ventos do quadrante Sul se apresentam com maior intensidade (>12 m/s). A rosa dos ventos está apresentada na Figura 15.

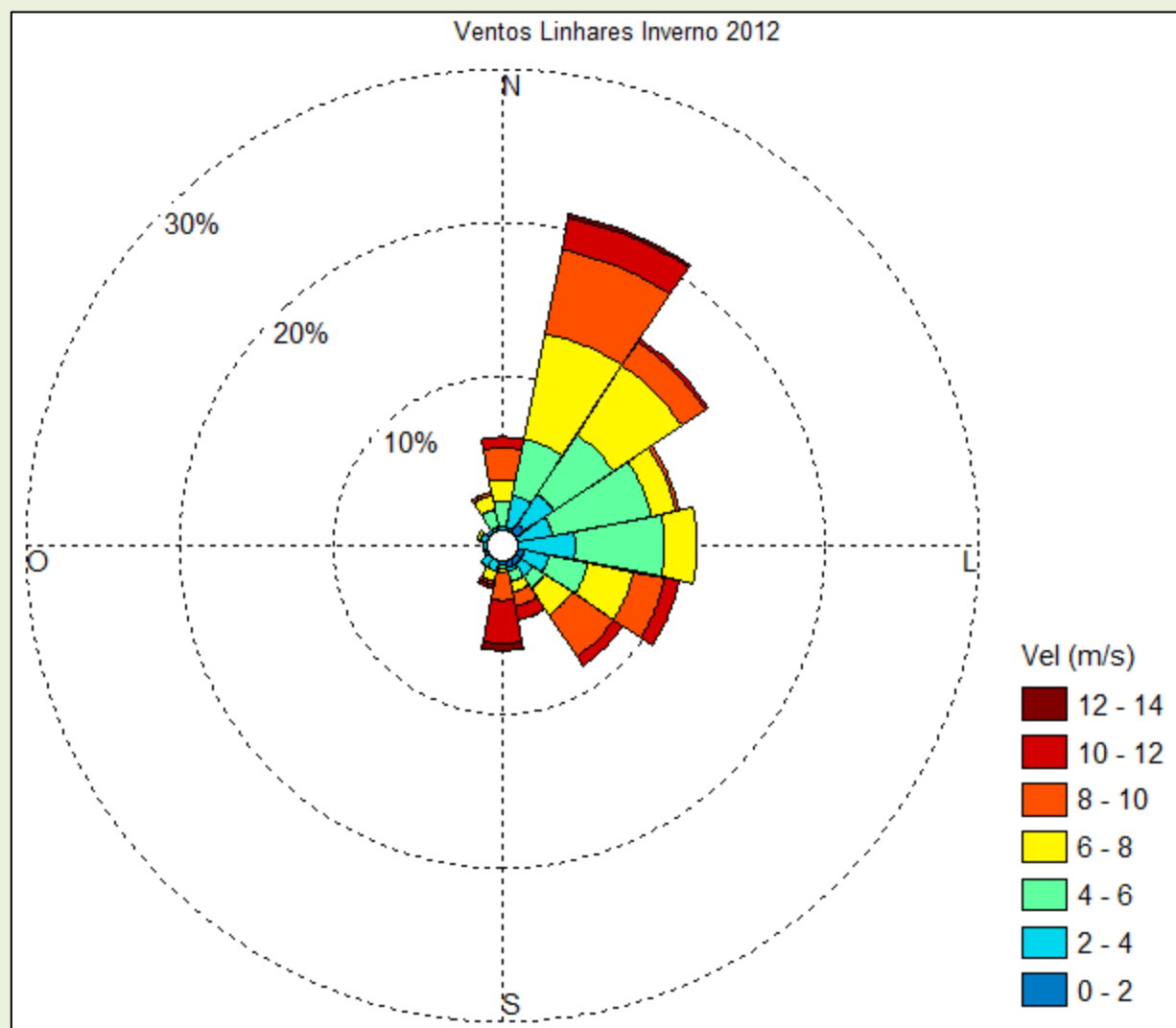


Figura 15: Rosa de ventos gerada com os dados provenientes do NOAA/NCEP para o período de inverno, utilizando dados de maio a agosto de 2010 (19,417° S, 39,15° O).

Na Figura 16 e Figura 17 são apresentados gráficos do tipo *Stick Plot* para os anos de 2011 e 2012. É possível observar a variação dos campos de vento ao longo dos meses do ano. Os dados de verão utilizados nas simulações das bases hidrodinâmicas estão grifados em laranja e os dados de inverno estão grifados em azul.

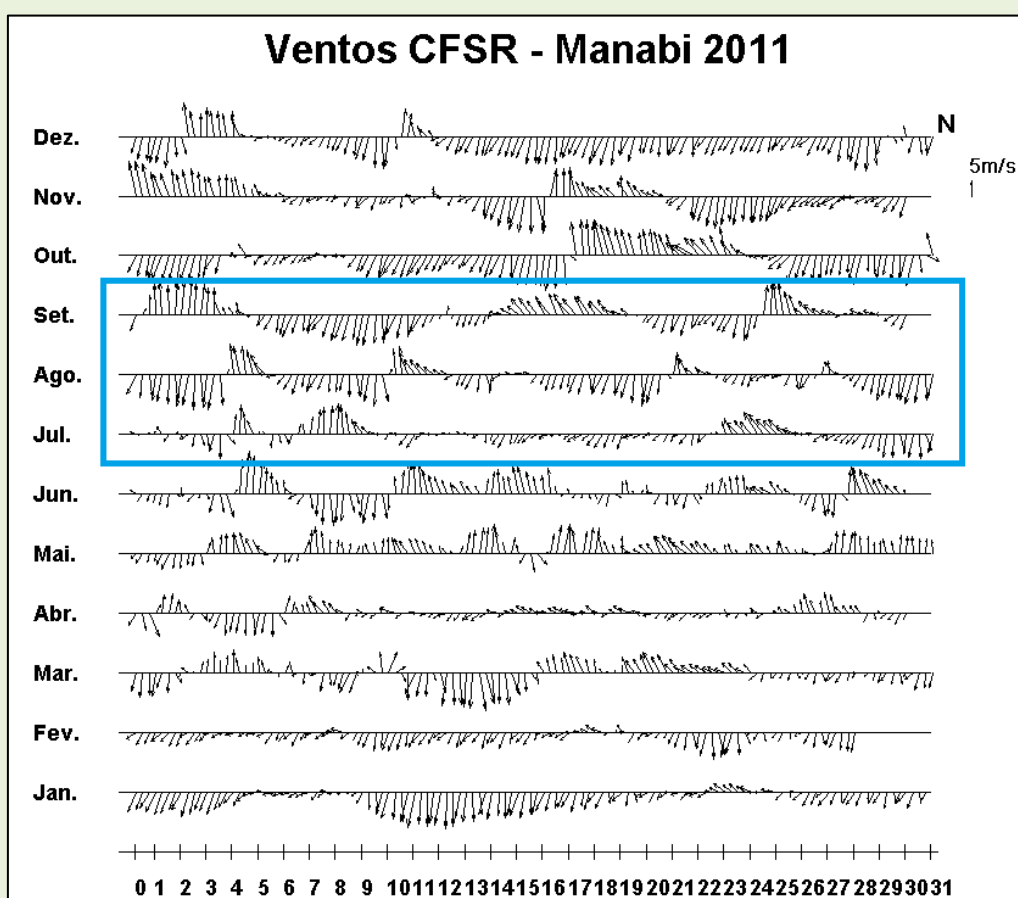


Figura 16: Direção e intensidades dos dados de vento do NCEP/NOAA extraídos para a região de estudo para o ano de 2011 (bloco laranja indica os meses de verão).

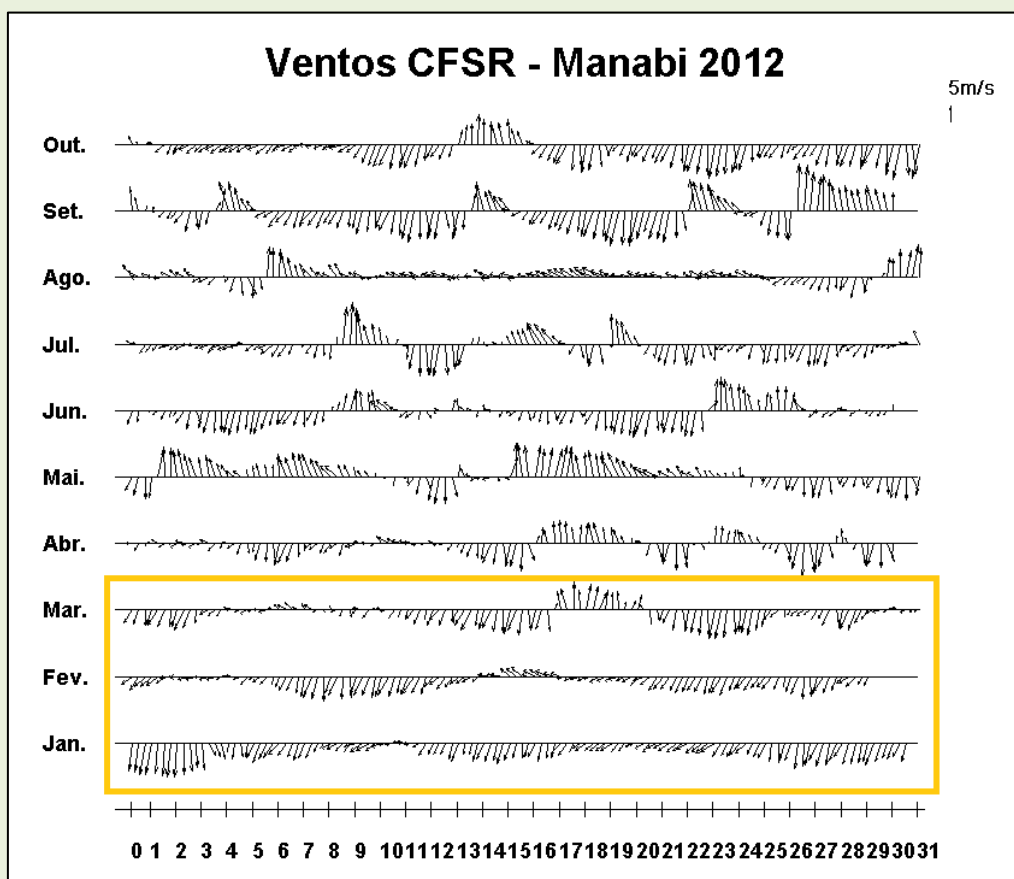


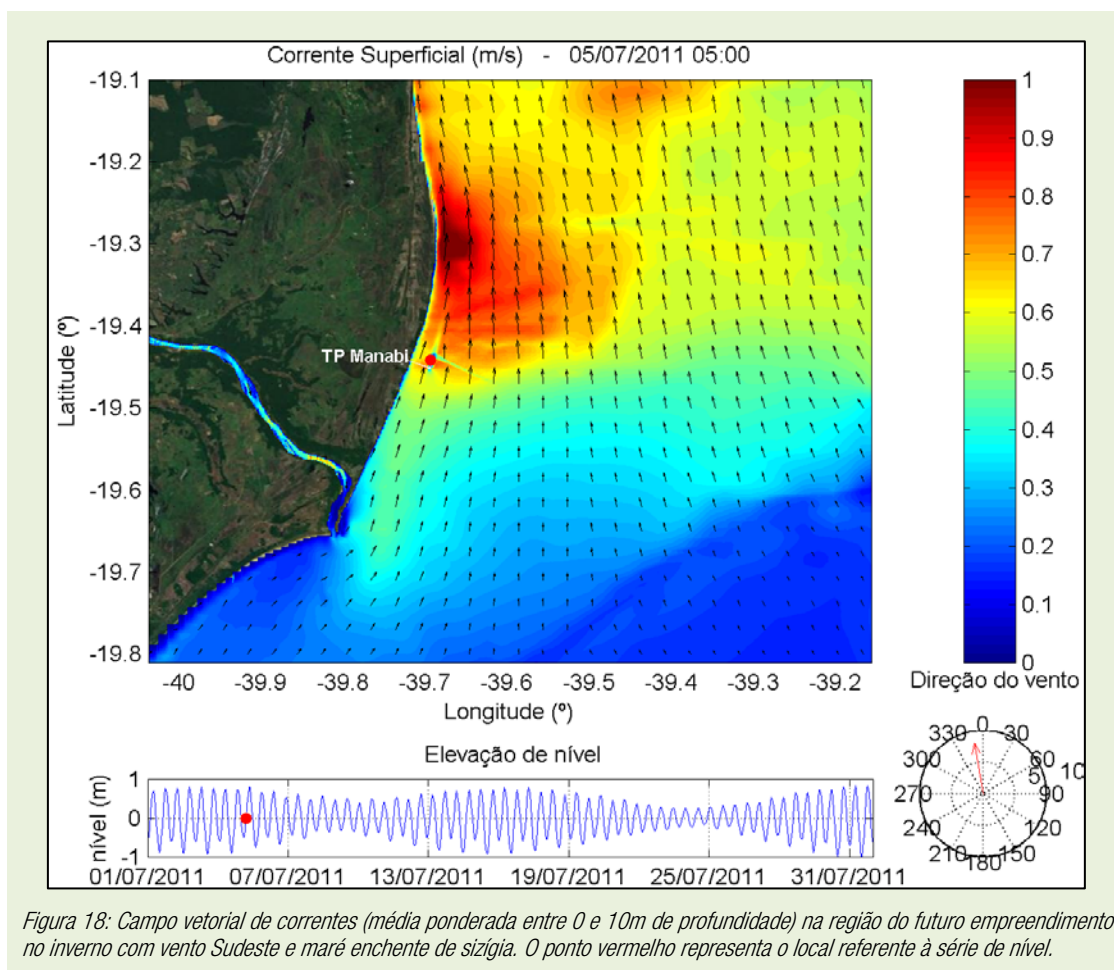
Figura 17: Direção e intensidades dos dados de vento do NCEP/NOAA extraídos para a região de estudo para o ano de 2012 (bloco laranja indica os meses de verão e bloco azul indica os meses de inverno).

Os resultados do campo hidrodinâmico obtidos das simulações conduzidas com o modelo Delft3D (velocidades de corrente em cada nó da grade numérica, salvos de hora em hora ao longo dos quatro meses de simulação) dos primeiros 10 metros de coluna d'água foram importados e assimilados pelo modelo de dispersão de óleo *OSIS*.

Os mapas vetoriais ilustrando os dados de correntes simulados pelo modelo numérico Delft3D e assimilados pelo modelo de dispersão de óleo *OSIS* estão apresentados da Figura 18 a Figura 24. As correntes na condição de maré de sizígia estão apresentadas da Figura 18 a Figura 20. 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 no verão (ventos característicos do quadrante Norte), as maiores magnitudes de correntes ocorrem no durante a vazante (sentido Norte-Sul).

Em período de quadratura, quando as amplitudes das marés são consideravelmente menores (Figura 22 a Figura 24), 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 dominado pela 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.

As bases hidrodinâmicas geradas pelo modelo Delft3D e os dados de vento para o mesmo período foram importadas ao modelo *OS/S*. Dessa maneira, foram conduzidas as simulações de vazamento hipotético de óleo no modo determinístico e probabilístico.



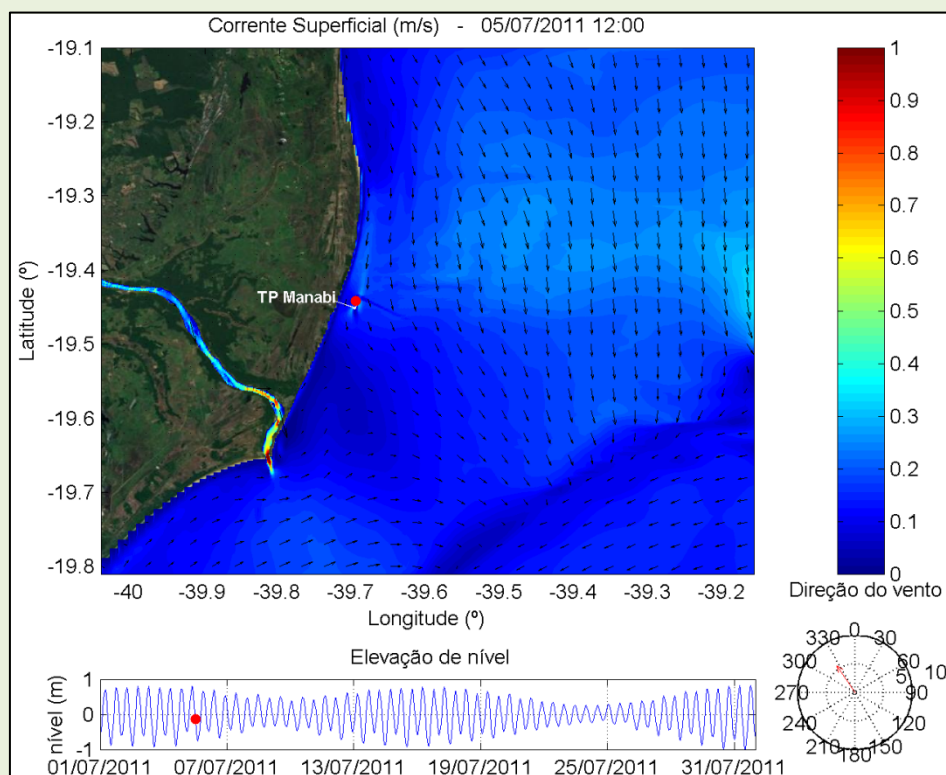


Figura 19: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no inverno com vento Sudeste e maré vazante de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

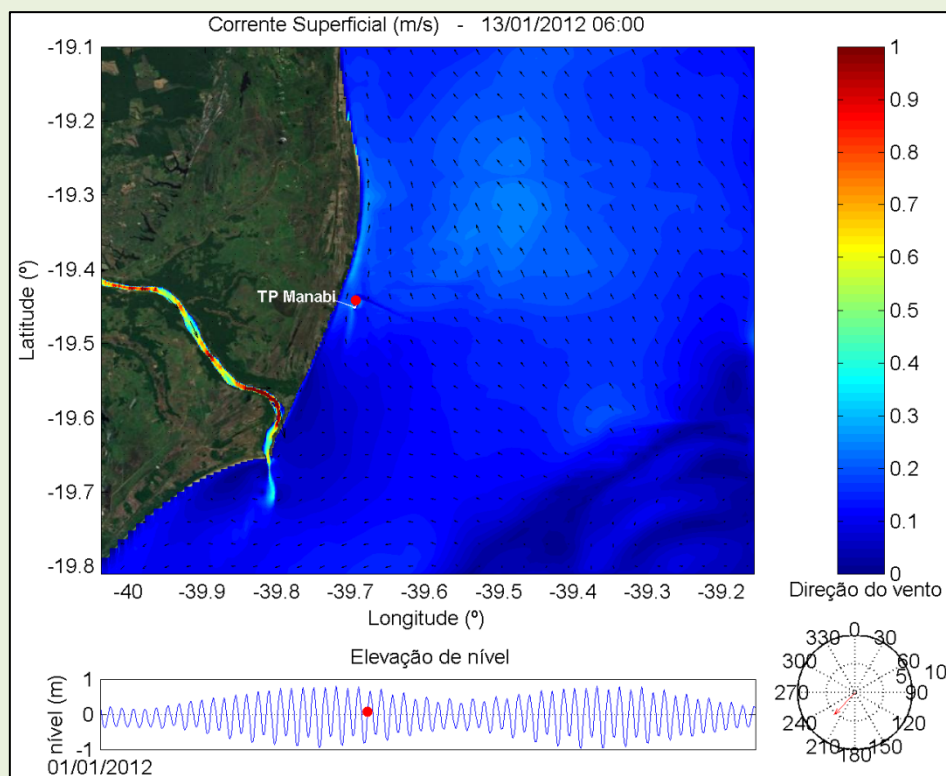


Figura 20: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no verão com vento Nordeste e maré enchente de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

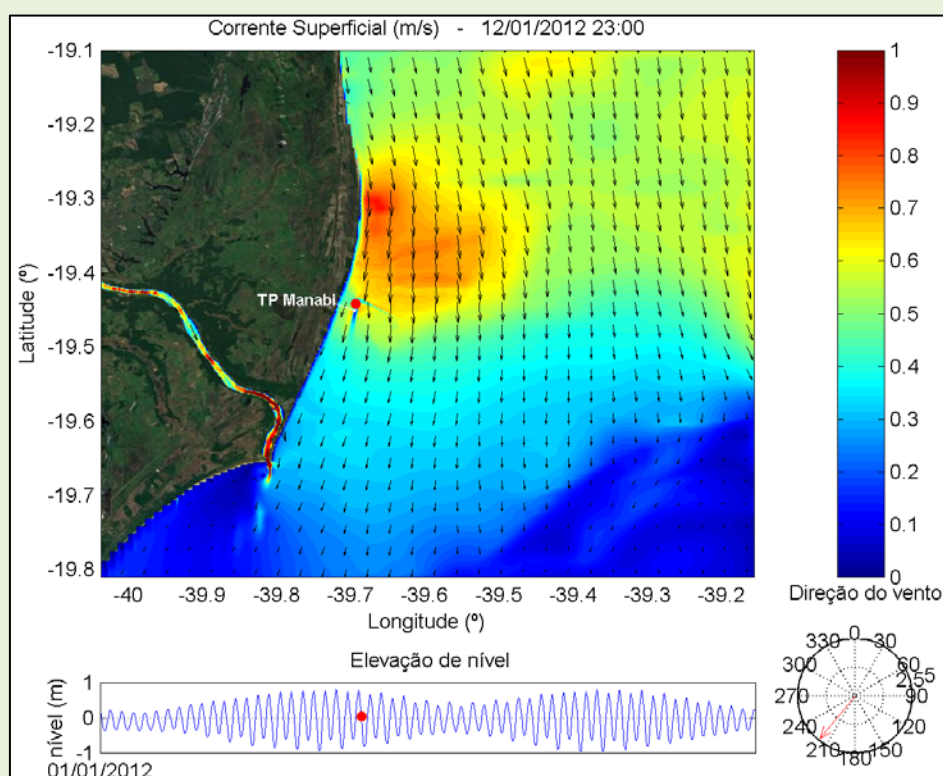


Figura 21: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no verão com vento Nordeste e maré vazante de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

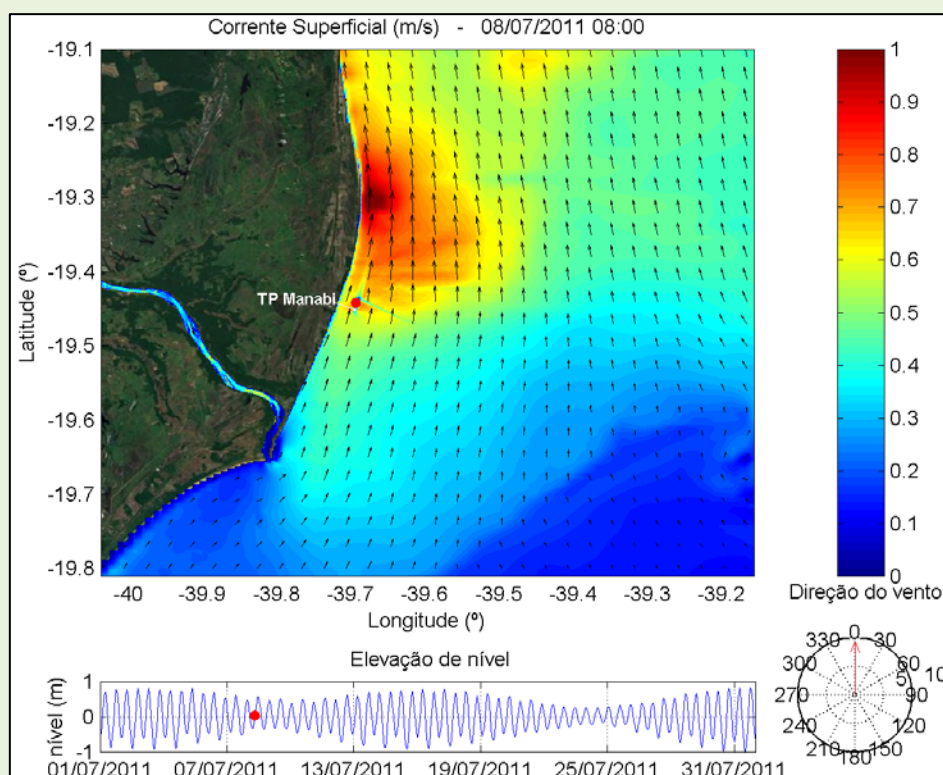


Figura 22: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no inverno com vento Sul e maré enchente de quadratura. O ponto vermelho representa o local onde a série de nível apresentada foi obtida e corresponde a região protegida do TP Manabi.

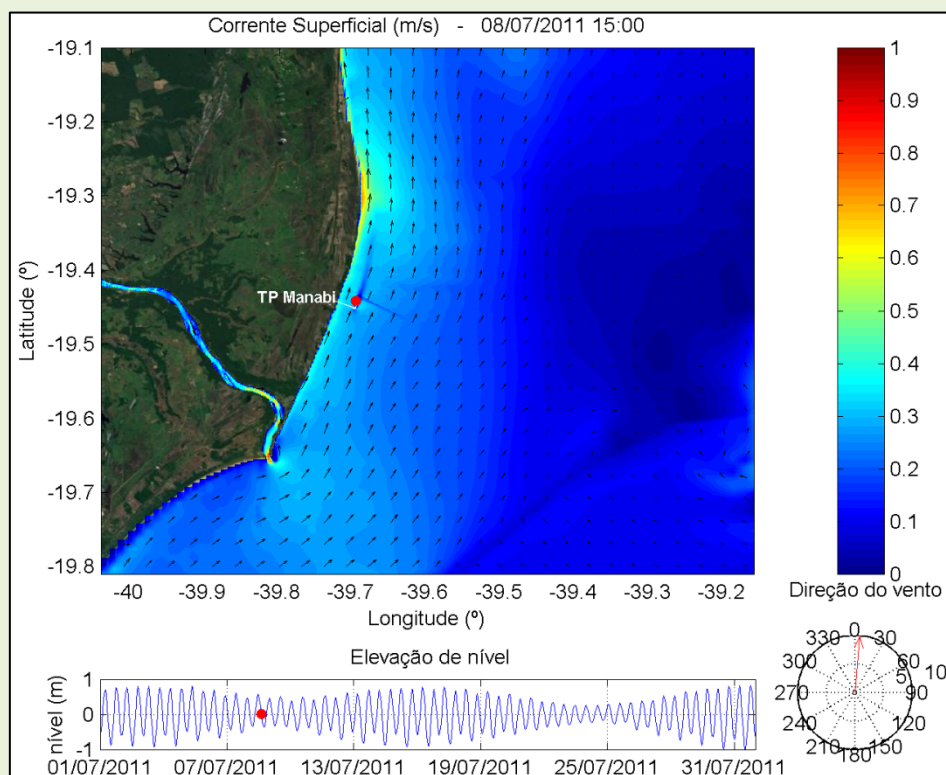


Figura 23: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no inverno com vento Sul e maré vazante de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

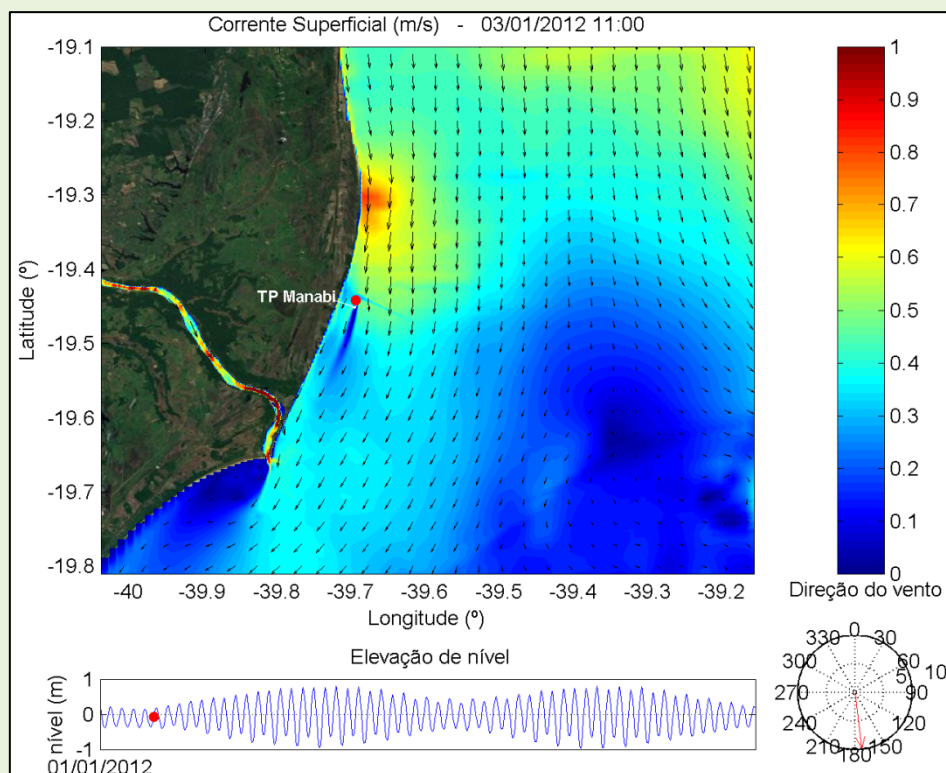


Figura 24: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no verão com vento Norte e maré enchente de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

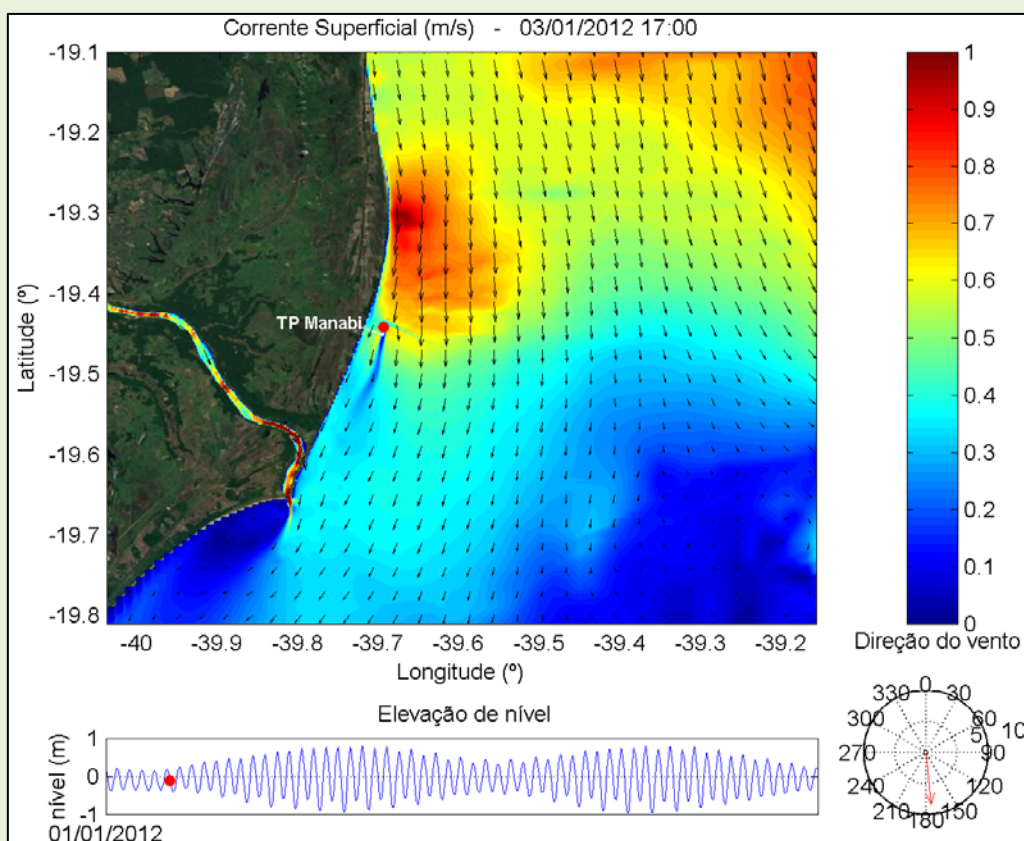


Figura 25: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento no verão com vento Norte e maré vazante de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

4 Modelagem de Derramamento de Óleo

O risco de derramamento de óleo no ambiente marinho é uma infortuna consequência da crescente demanda por este recurso natural. Em muitas regiões, a produção, instalações de armazenamento e rotas de navegação estão próximas de zonas costeiras, onde os derrames de hidrocarbonetos podem ser potencialmente desastrosos. Um requisito fundamental para a implementação de uma resposta bem sucedida a um derramamento de óleo é a capacidade de mobilizar os recursos adequados para as regiões costeiras em risco antes de o óleo atingir a costa. A chave fundamental para alcançar esse objetivo é conhecer o tempo necessário para o impacto na costa, localização e extensão do impacto, bem como o estado físico provável do óleo que chegará às praias e outras regiões sensíveis. Os modelos numéricos de dispersão de óleo fornecem a ferramenta ideal para apoiar operações de combate a derramamentos de óleo, dando informações sobre a trajetória e destino do óleo no ambiente marinho, o impacto na costa, bem como as propriedades físicas do óleo. Em modo operacional, os modelos se tornam uma fonte primária de informação, capaz de orientar as operações de resposta. Alternativamente, em planos de contingência, os modelos são valiosíssimos para testar a validade e a eficácia dos planos de ação propostos e o treino eficiente de pessoal através de exercícios realísticos de resposta.

Entre 1988 e 1994, o *Warren Spring Laboratory*, do Reino Unido, desenvolveu um conjunto de modelos com o objetivo de prever as consequências de uma série de calamidades ocorridas no mar. Os modelos predizem a trajetória e o destino de óleos derramados, uma vasta gama de produtos químicos não persistentes transportados a granel, produtos químicos persistentes e deriva de objetos flutuantes. Em abril de 1994 o *Warren Spring Laboratory* fundiu-se com *AEA Technology* (AEAT) e os modelos foram transferidos para o AEAT (Centro Nacional de Tecnologia Ambiental), onde continuaram a ser desenvolvidos.

Atualmente, o modelo de deriva de óleo, o *Oil Spill Information System (OSIS)*, é executado em ambiente Windows, em qualquer PC ou sistema compatível. O OSIS é o resultado de um desenvolvimento conjunto com a *British Maritime Technology* (BMT). Os outros modelos, denominados coletivamente Eurospill, são executados em ambiente DOS em um PC.

O *OSIS* está disponível comercialmente e é usado por uma variedade de usuários finais, incluindo diversas organizações de resposta, como a *UK Marine Pollution Control Unit (MPCU)* e *Oil Spill Response*, órgãos do governo (por exemplo Oman), e pelas companhias de petróleo, tais como Shell, British Petroleum, Total e Maxus na Indonésia. Todas as versões do Eurospill são usadas pelo MPCU e a versão de óleo e produtos químicos não-persistentes foi distribuída a todos os Estados Membros da Comunidade Européia. O *OSIS* é um sistema de modelos que pode ser utilizado em Planos de Contingência, Planos de Emergência com acompanhamento em tempo real, Planos de Emergência Individuais, Relatório de Controle Ambiental e Estudos de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) no Brasil e em qualquer região do mundo.

O objetivo mais comum de um modelo de deriva de óleo ou vazamento de produto químico é o de prever a trajetória e o destino da mancha e é particularmente valioso quando uma indicação das áreas litorâneas ameaçadas é obtida. Uma mancha presente em mar aberto pode impactar o litoral a uma distância considerável do local de derrame, ou pode nunca chegar à costa: há muitos fatores envolvidos, fazendo de uma previsão rigorosa um processo complexo. Um modelo pode indicar o resultado mais provável de um derrame, auxiliando no sentido de alertar as autoridades competentes para a limpeza das praias, manguezais e costões rochosos, a colocação de equipamentos de resposta no mar em locais apropriados ou mesmo sugerindo que nenhuma resposta é necessária. Também é importante na determinação da escala de resposta requerida e da quantidade e distribuição do óleo em uma mancha.

No passado, os processos de dispersão e espalhamento de uma mancha foram considerados separadamente. Os trabalhos de Blokker (1964) e Fay (1971), modificados por Lehr et al. (1984), apresentam métodos para prever o espalhamento baseados em forças que atuam sobre o petróleo em si. Um regime de três fases foi proposto, com as fases dependendo das forças dominantes de espalhamento (gravidade e tensão superficial) e das forças de retardamento (inércia e viscosa). A técnica assume um espalhamento uniforme em todas as direções, dando, conseqüentemente, manchas circulares. Modificações de Lehr (Op. cit.) para o método permitiram que a forma fosse alterada para algo mais realista, mas as hipóteses continuaram as mesmas. O movimento de uma mancha é adicionado à difusão, com parâmetros ambientais, como velocidade e direção do vento e velocidade e direção das correntes, simplesmente advecando toda a mancha da mesma forma. A simplicidade da abordagem levou à sua adoção generalizada, apesar de existirem poucas evidências concretas para sustentação das formulações. Dados observacionais foram limitados a estudos laboratoriais e em águas calmas e testes de mar posteriormente mostraram que o método é falho para condições típicas e reais. Problemas com a abordagem de Fay (1971) foram amplamente discutidos por Elliott et al. (1986).

Mais recentemente, foi modelada a influência dos processos de difusão na superfície, na camada de cisalhamento, região na qual a turbulência domina a circulação, difusão e dispersão de poluentes. Esta abordagem permite ao modelo incluir, separadamente, a influência dos ventos, ondas e correntes de maré, melhorando sua validade em uma gama de condições ambientais. Ensaio no mar efetuados pelo *Warren Spring Laboratory* mostraram esta abordagem como sendo mais realística, com modelos capazes de simular o movimento e propagação de uma mancha de forma convincente.

O modelo de transporte Eurospill e OSIS foi desenvolvido conjuntamente pelo *Warren Spring Laboratory, Unit for Coastal and Estuarine Studies (University College North Wales)* e *Stazione Oceanografica* (Itália).

A técnica convencional de modelagem poderia ser resolvida através de um método de diferenças finitas, a equação da difusão/advecção:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{u\partial C}{\partial x} + \frac{v\partial C}{\partial y} + \frac{w\partial C}{\partial z} = \frac{\partial C}{\partial x} \frac{(k_h \partial C)}{\partial x} + \frac{\partial C}{\partial y} \frac{(k_h \partial C)}{\partial y} + \frac{\partial C}{\partial z} \frac{(k_h \partial C)}{\partial z} + \delta_s - \delta_r$$

onde u, v e w são termos advectivos, k_h e k_v são coeficientes de difusão horizontal e vertical, respectivamente, e δ_s e δ_r são termos fonte e sumidouro, respectivamente. No *OSIS*, no entanto, os diferentes termos são determinados a partir de um modelo de acompanhamento aleatório das partículas e de modelos de caracterização da compressibilidade dos fluidos (*bulk properties models*).

Os processos físicos oceanográficos modelados são considerados os processos mais importantes na simulação da advecção e difusão de um poluente no ambiente marinho. As ações de maré, ondas e ventos, juntamente com o efeito das correntes e turbulência são modeladas no *OSIS* e o movimento previsto, considerando a dispersão lateral e vertical de uma mancha, mostrou uma boa representação de processos reais, tal como observado após derrames acidentais e testes no mar realizados pelo WSL e AEAT.

Os parâmetros oceanográficos são usados para construir um campo de velocidades tridimensional, no qual o movimento das parcelas individuais, que representam elementos da mancha, podem ser monitorados (rastreamento de partículas). Um elemento aleatório simulando a turbulência é aplicado, o qual pode aumentar ou diminuir a propagação de uma mancha (*random walk*).

Evidências de que uma porção de óleo ou produto químico pode ser considerada como gotas individuais, que serão transportados pelas correntes e processos de turbulência na coluna d'água, foram fornecidas por Forrester (1986) que observou gotas de óleo embaixo de uma mancha a profundidades superiores a 20 m. Evidência adicional é proveniente do trabalho realizado com o uso de um sistema sonar (THORPE, 1984), que mostra que a penetração em profundidade (em metros) de bolhas de ar é igual à velocidade do vento (em m/s). Mais recentemente, medições de tamanhos de gotas de óleo *in situ* têm sido realizadas pelo WSL (LUNEL, 1993).

O *OSIS* foi projetado em uma configuração modular de forma que diferentes tipos de modelos, bem como um conjunto de ferramentas sofisticadas de dados ambientais, possam ser acoplados dependendo do problema e da situação em estudo. Através de sua interface gráfica, permite ao usuário a especificação dos cenários, animação das trajetórias, correntes e vento, importar e exportar dados ambientais, definição da grade computacional para qualquer área dentro do domínio, incluir ou editar as características dos óleos registrados no banco de dados, apresentar dados contidos em objetos georreferenciados (SIG) e determinar o impacto ambiental em recursos naturais. As funções do SIG permitem ao usuário a entrada, manipulação e exibição de objetos na tela através de pontos, linhas e polígonos georreferenciados ao domínio definido pelo cenário. A cada objeto podem ser atribuídos dados em formato de texto, valores numéricos ou arquivos a partir de links externos.

O *OSIS* inclui os seguintes módulos:

Standard Spill Model – permite a simulação de um cenário de vazamento pontual sob um único conjunto de condições meteorológicas e oceanográficas;

Draw Spill Model – permite a simulação da trajetória e intemperismo do óleo a partir de uma dimensão horizontal inicial conhecida.

Backtrack Model – possibilita que um vazamento seja rastreado de forma reversa no tempo, para que sua fonte seja identificada.

Floating Object – permite a predição de trajetória de um objeto flutuante sob um conjunto de condições meteorológicas e oceanográficas.

Adicionalmente, dois módulos estocásticos são disponíveis:

Stochastic Wind Rose Model – permite a simulação de um cenário de vazamento pontual sob diferentes condições meteorológicas e oceanográficas prováveis (definidas a partir da porcentagem de ocorrência de diferentes intensidades e direções do vento);

Stochastic Time Series Model – permite a simulação de um cenário de vazamento pontual sob um número especificado de cenários, selecionados randomicamente a partir de uma série temporal de condições meteorológicas e oceanográficas variáveis.

O modelo de deriva de óleo prevê o transporte e intemperismo do óleo a partir de derrames instantâneos e contínuos. As estimativas demonstram a localização e espessura do óleo em relação ao tempo. O modelo estima a variação temporal da espessura da mancha e o balanço da massa de óleo ou a quantidade de óleo sobre a superfície do mar, na coluna de água, evaporado, na costa e fora da área de estudo em relação ao tempo. Os processos de transformações biogeoquímicas no modelo incluem dispersão, evaporação, entranhamento, dispersão natural e emulsificação.

Utilizando-se o *OS/S* em modo estocástico (ou probabilístico), é possível considerar a variabilidade das forçantes ambientais no deslocamento da mancha. As múltiplas trajetórias simuladas são utilizadas para a produção de curvas de contorno, demonstrando a probabilidade da presença de óleo em cada ponto da área de estudo. As probabilidades de presença de óleo e tempo de deslocamento da mancha podem ser correlacionadas a recursos naturais armazenados no banco de dados (SIG), de forma a auxiliar na avaliação de impactos ambientais em termos da probabilidade da presença de óleo em recursos importantes.

4.1 DADOS DE ENTRADA

Os conjuntos de dados de entrada e parâmetros do modelo que definem um cenário são:

- Localização geográfica do ponto de derrame;
- Duração do derrame;
- Volume derramado;
- Tipo de óleo;
- Duração da simulação;
- Opções de resposta (e.g. dispersantes);
- Campo de correntes;
- Arquivo de dados meteorológicos;
- Parâmetros de simulação (número de partículas)
- Número de partículas.

Os resultados de cada simulação correspondem, então, a um único cenário, definido pelo arquivo de entrada de dados e parâmetros do modelo.

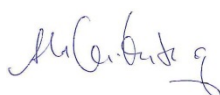
As temperaturas médias do ar e da superfície do mar, que influenciam no comportamento físico do óleo derramado, foram definidas para os períodos de verão e inverno. A média sazonal de temperatura do ar foi definida com base no banco de dados do CPTEC (Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos: www.cptec.inpe.br/clima). De acordo com estes dados, a temperatura média do ar nos meses de verão de 2011/2012, para a área de estudo, foi de 26,5°C. A temperatura média do ar nos meses de inverno de 2011, para a área de estudo foi de 22°C.

A média sazonal de temperatura da superfície do mar foi definida de acordo com dados do satélite MODIS-Terra (disponível em <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>), e consistem de médias mensais com resolução espacial de 9 km. A temperatura média da superfície do mar para a região de estudo nos meses de verão de 2011/2012 foi de 27°C para o inverno de 2011 a temperatura média foi de 23,5°C.

4.2 PONTO DE RISCO E VOLUMES

Para este estudo foi considerado o ponto de maior risco de vazamento de óleo, cujas coordenadas foram especificadas pela equipe da CB&I em conjunto com a Econservation (19°446'S, 39°697'W). A localização do ponto é apresentada na Figura 26. O ponto de derrame simulado representa potencial vazamento de óleo no berço de atracação.

As simulações foram conduzidas de acordo com os critérios estabelecidos na Resolução CONAMA nº398/08, que define 3 (três) classes de derramamento: pequeno, com um volume de até 8 m³; médio, com até 200 m³ e de pior caso, definido de acordo com as características das operações, podendo ser o rompimento do mangote, afundamento da embarcação ou perda de controle do poço. Foi definido o pior caso como sendo o afundamento e vazamento de toda capacidade de armazenamento do tanque da maior embarcação de projeto (Cape Size – 300 m - 5600 m³).



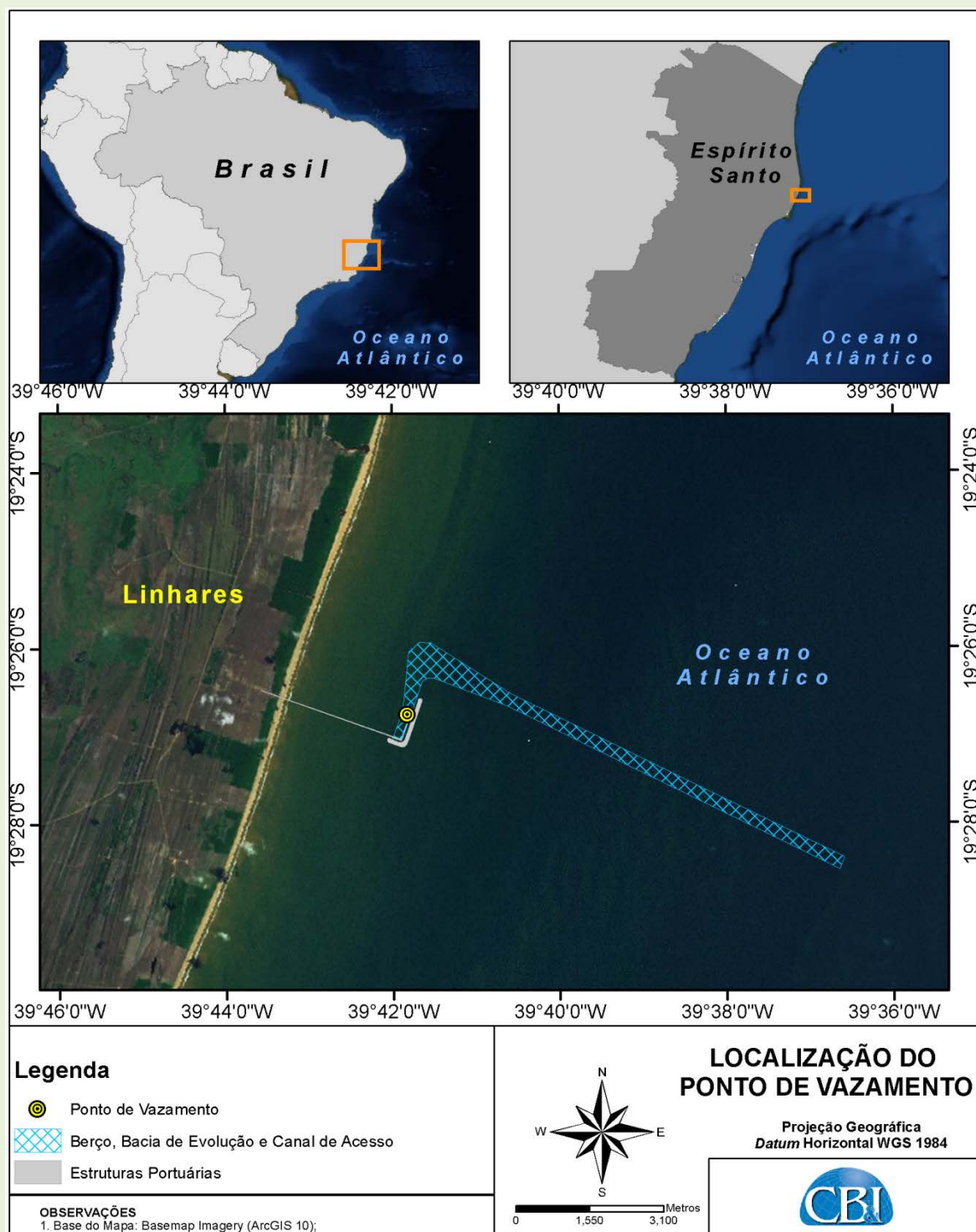


Figura 26: Localização do ponto de risco selecionado no Porto Norte Capixaba.

4.3 CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO SELECIONADO

As simulações numéricas de dispersão de óleo foram realizadas para Bunker C, cujas características encontram-se definidas na Tabela 6. O óleo combustível marítimo Bunker C, é líquido inflamável, viscoso e escuro, de solubilidade desprezível na água, composto basicamente por hidrocarbonetos e com odor característico. É esperada baixa degradação e alta persistência na água (PETROBRAS, 2011).

Tabela 6: Características do óleo combustível marítimo Bunker C. Modificado de Petrobras (2011).

PARÂMETRO	BUNKER C
Natureza Química	Hidrocarboneto
Densidade	0.98 kg/L
Temperatura de auto-ignição	350°C
Evaporação	Muito Lenta
Viscosidade	420 Cst @50°C, Método: MB293
Ponto de Fulgor	60°C; Método: vaso fechado
Solubilidade (na água)	Desprezível

4.4 CRITÉRIO DE PARADA ADOTADO NAS SIMULAÇÕES

Para as simulações foi adotado o tempo de 60 horas para o acompanhamento da mancha de óleo. Esse tempo corresponde ao tempo máximo para a disponibilização de recursos de contenção/limpeza no local da ocorrência da descarga de acordo com a Resolução CONAMA nº 398/08.

Com o objetivo de gerar o cenário mais conservador possível do ponto de vista ambiental, os cenários simulados não consideram nenhuma ação de resposta ou contenção do óleo derramado durante o período de simulação.

4.5 SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS

As simulações no modo probabilístico consideram a variabilidade das forçantes ambientais (correntes e ventos). Logo, as simulações de comportamento da mancha são realizadas através da variação aleatória do início do vazamento, dentro do período para o qual se dispõe de dados ambientais. Para que se pudesse incorporar a variabilidade das forçantes meteorológicas e oceanográficas, foi realizada com o modelo *OS/S* uma série de 600 simulações para cada cenário probabilístico.

Na Tabela 7 são apresentados os cenários probabilísticos simulados neste estudo. A terminologia adotada para identificações dos cenários probabilísticos é apresentada com as indicações do volume de óleo simulado, duração do vazamento, período do ano, e tempo máximo de simulação adotado.

Tabela 7: Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derrames de óleo.

CENÁRIO	VOLUME (m³)	DURAÇÃO DO VAZAMENTO	PERÍODO	TEMPO MÁX. (h)
Verão 8	8	1 hora	Verão	60
Verão 200	200	1 hora	Verão	60
Verão 5600	5600	2 horas	Verão	60
Inverno 8	8	1 hora	Inverno	60
Inverno 200	200	1 hora	Inverno	60
Inverno 5600	5600	2 horas	Inverno	60

4.6 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS DE DERRAME DE ÓLEO

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações probabilísticas de derrame de óleo nas proximidades do Porto Norte Capixaba da Manabi Mineração, para cada cenário descrito na Tabela 7.

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.

Nas figuras abaixo são apresentados os contornos de probabilidade de alcance de óleo na área de estudo, considerando cada período (verão e inverno) sob distintas condições meteorológicas e oceanográficas.

Nota-se na Figura 27, Figura 28 e Figura 29 que a mancha de probabilidade de dispersão do óleo no período de inverno é alongada no sentido Norte-Sul. De uma maneira geral, para todos os volumes de vazamento a mancha de probabilidade se apresentou bastante similar, indicando, independentemente do volume de vazamento, a tendência de dispersão da mancha de óleo latitudinalmente. Para Norte, a mancha de probabilidade chega a aproximadamente 140 km, para Sul chega a 135 km, já em direção ao mar a mancha não chega a 10 km (na latitude do lançamento). Em função da entrada de frentes frias, com ventos em geral de Sul e Sudeste, nota-se que as maiores probabilidades de presença do óleo estão diretamente a Norte do empreendimento, principalmente próximos à costa, isso ocorre devido à orientação da costa e aos ventos de Sul/Sudeste que fazem com que o óleo se dirija para a praia. Ainda para o Norte, as manchas podem chegar a vários quilômetros do empreendimento, porém, a probabilidade de ocorrência é bastante baixa (<10%). Sob influência de ventos e correntes do sentido Norte-Sul, a mancha de probabilidade se espalha também longitudinalmente. Ao Sul do Rio Doce ocorre uma reorientação da linha de costa, e juntamente com a barreira hidráulica imposta pelo próprio Rio Doce, a probabilidade de toque do óleo na costa torna-se bastante reduzida.

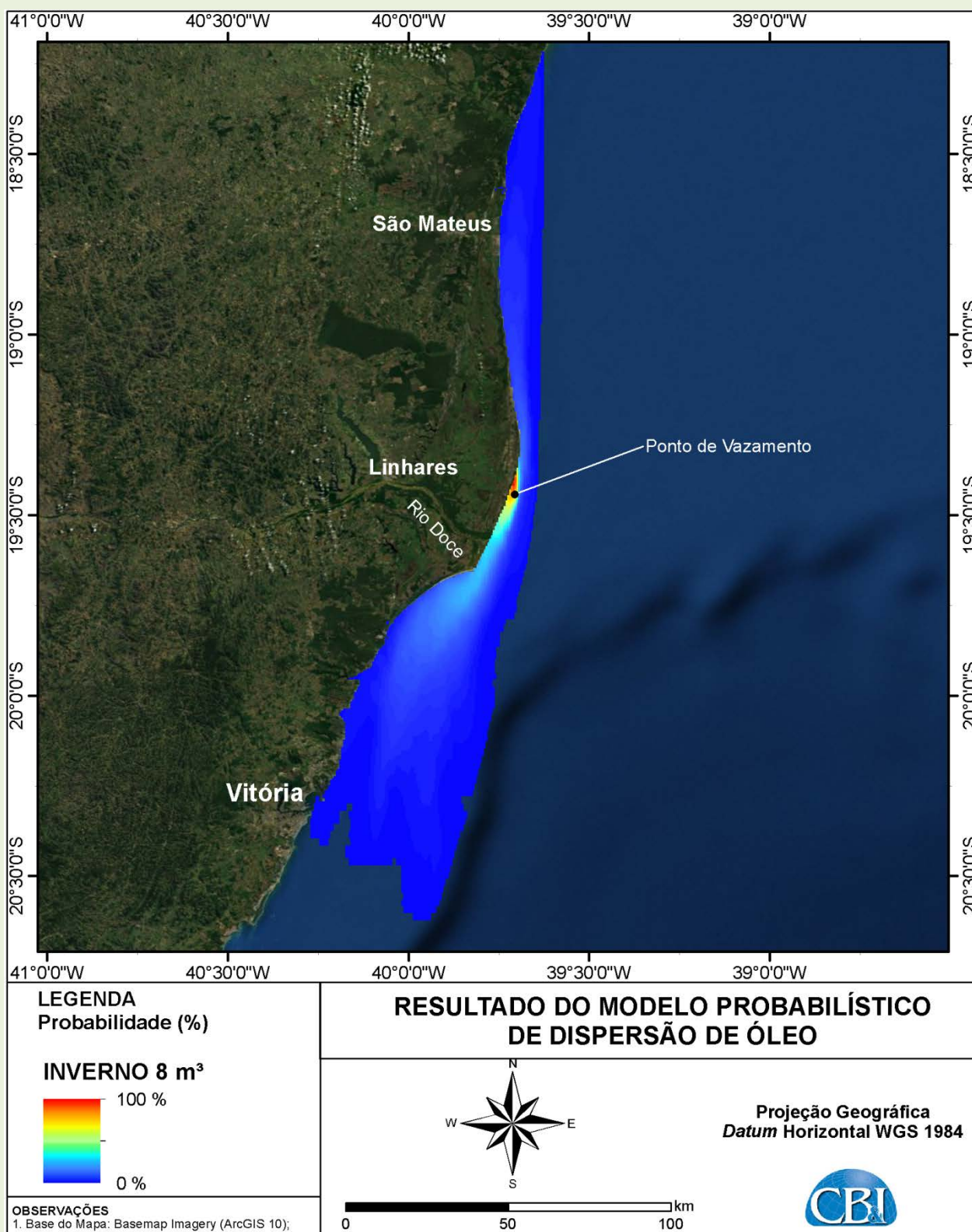


Figura 27: Probabilidade de alcance do óleo na água para um vazamento hipotético de 8 m³ de Bunker C durante os meses de inverno.

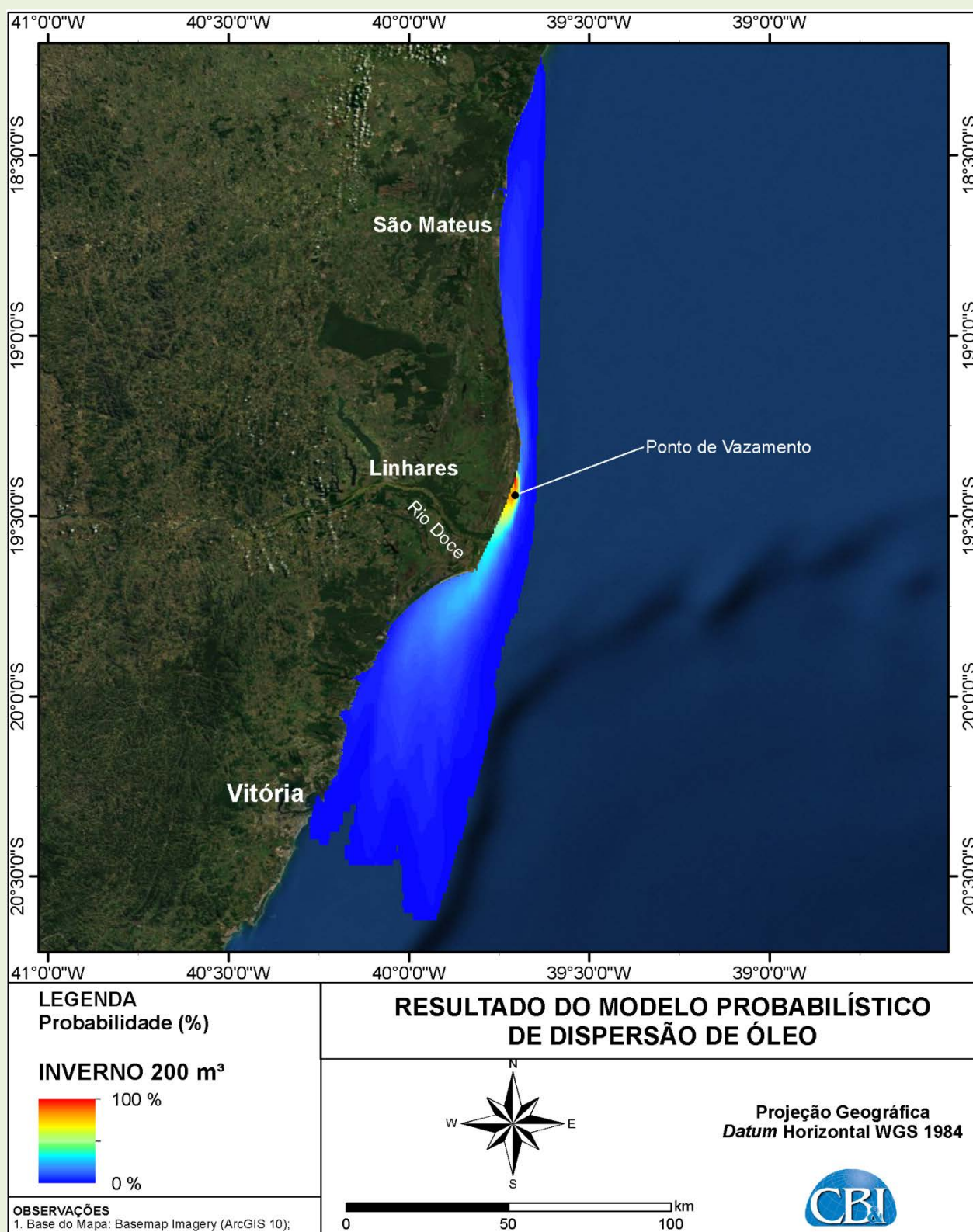


Figura 28: Probabilidade de alcance do óleo na água para um vazamento hipotético de 200 m³ de Bunker C, durante os meses de inverno.

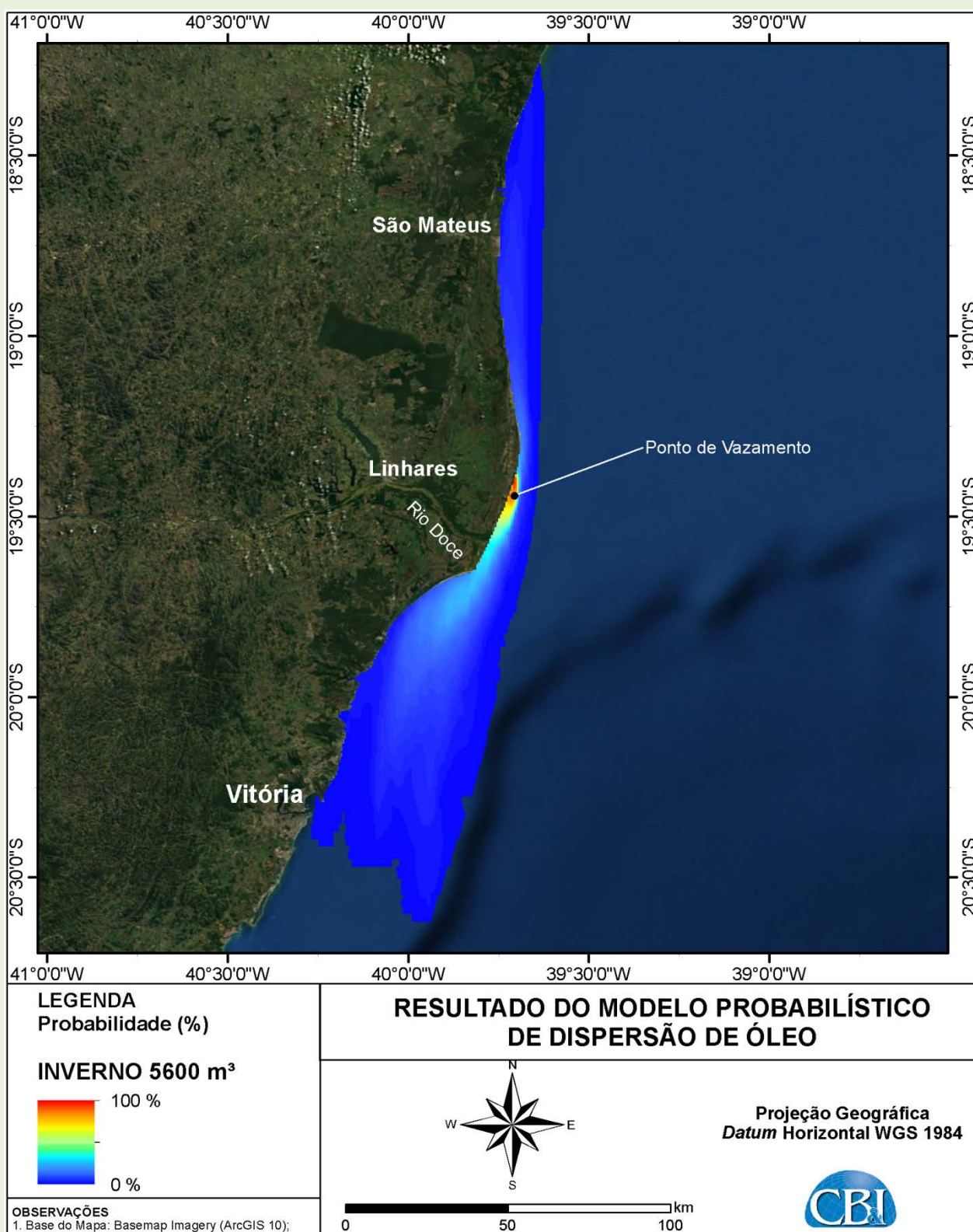
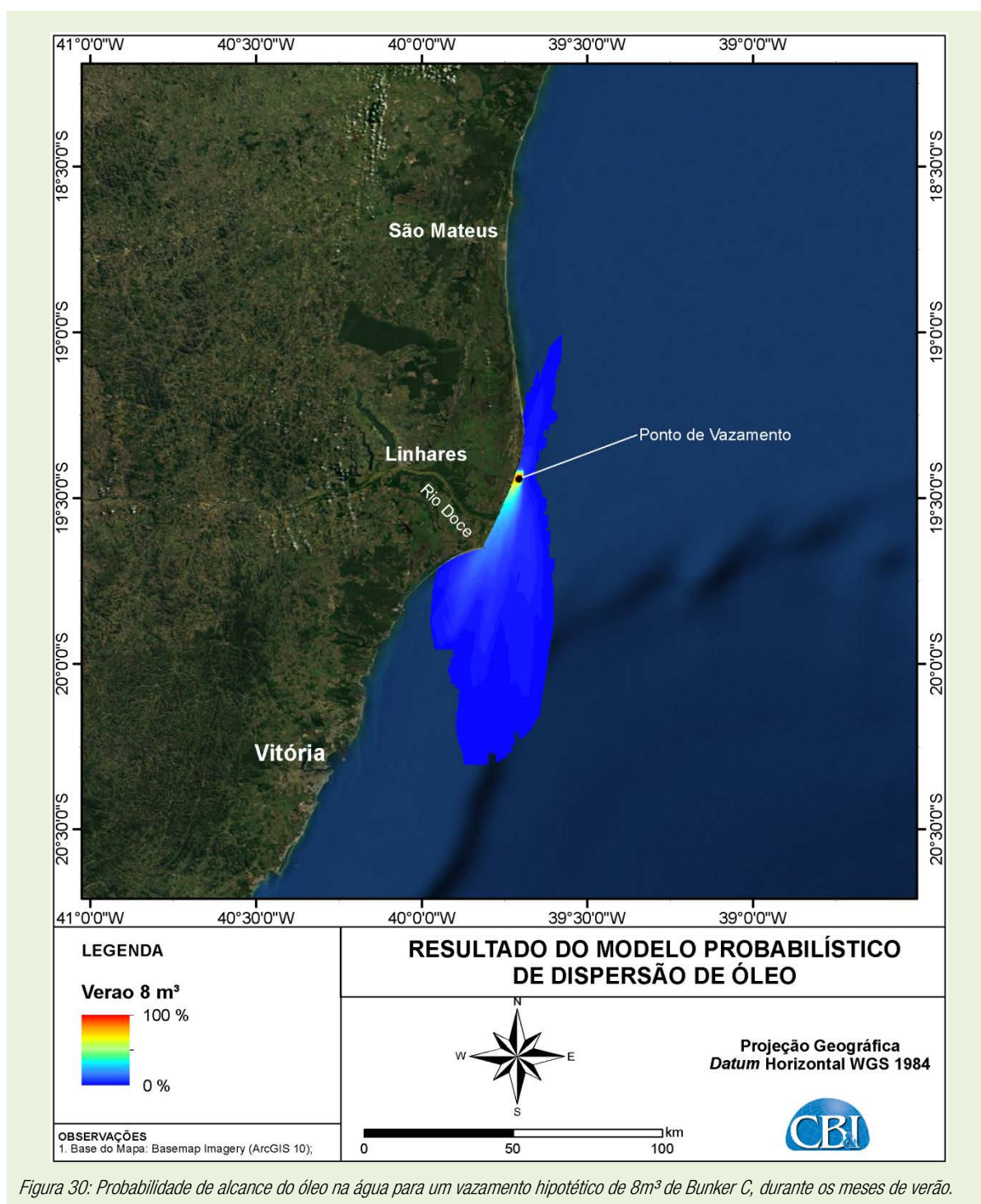


Figura 29: Probabilidade de alcance do óleo na água para um vazamento hipotético de 5600m³ litros de Bunker C durante os meses de inverno.

As manchas de probabilidade de dispersão de óleo para o período de verão estão apresentadas na Figura 30, Figura 31 e Figura 32. As manchas de probabilidade para os volumes simulados para o período de verão foram bastante similares ao de inverno em função da grande persistência do Bunker C na água. Durante o verão, as manchas de probabilidade chegam a aproximadamente 40 km para o Norte e 80 para o Sul. Na latitude do vazamento a largura da mancha é inferior a 10 km. Entretanto, no sentido Norte, observa-se que a mancha de probabilidade que toca a costa não ultrapassa 20 km, e a probabilidade é bastante baixa (<5%) para todos os volumes de vazamento. Em função da maior frequência de ventos nordeste no verão, a mancha de probabilidade se estende para Sul do Rio Doce, com probabilidade de cerca de 30% até pouco mais de 30 km ao sul do Rio. Entre o Rio Doce e o empreendimento, são encontradas as maiores probabilidades de dispersão de óleo próxima à costa (entre 30 e 75%).



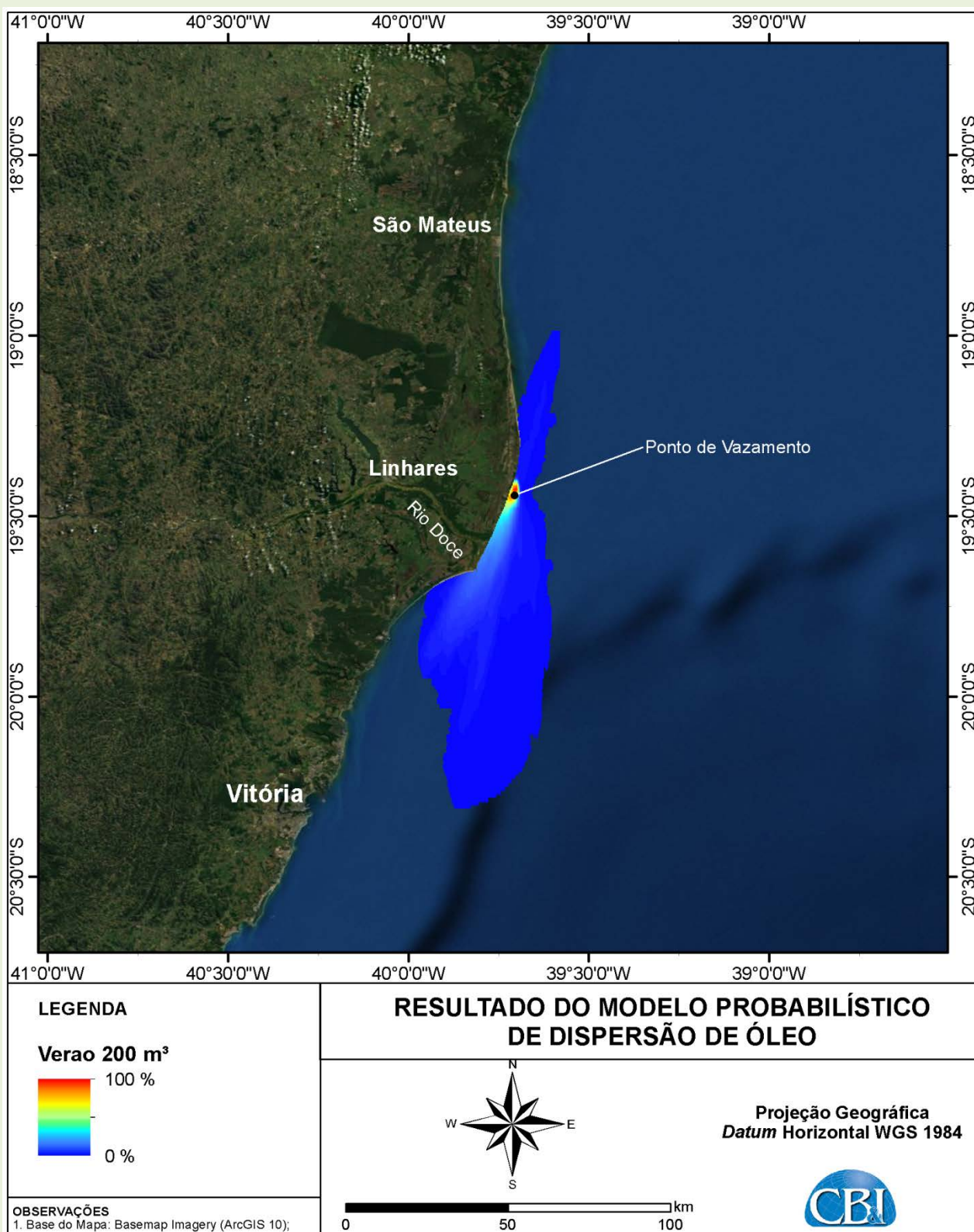


Figura 31: Probabilidade de alcance do óleo na água para um vazamento hipotético de 200m³ de Bunker C, durante os meses de verão.

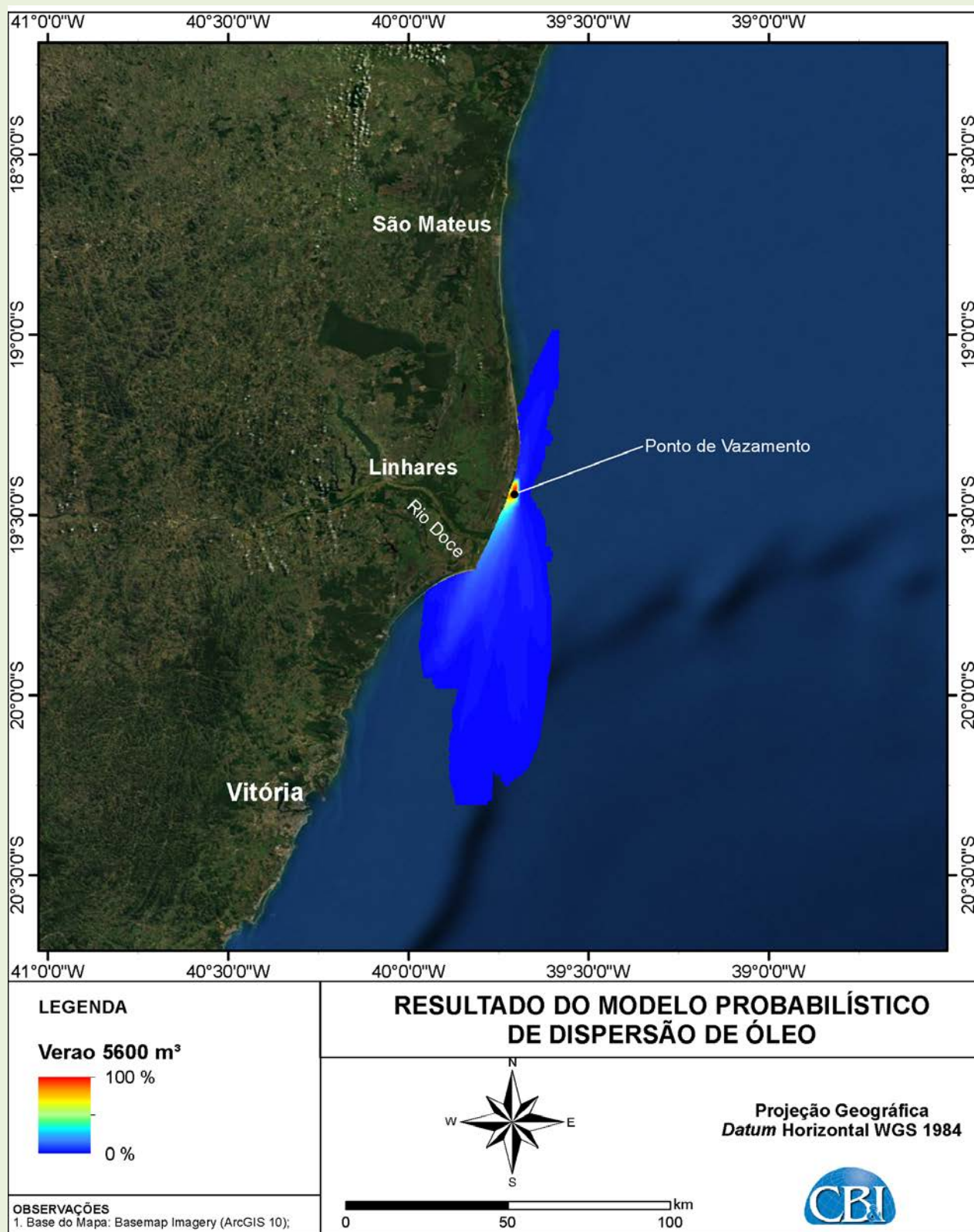


Figura 32: Probabilidade de alcance do óleo na água para um vazamento hipotético de 5.600m³ de Bunker C, durante os meses de verão.

4.7 SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS

Para as simulações determinísticas foram escolhidos dois cenários de pior caso, um de verão e um de inverno, selecionados com base nos resultados das simulações probabilísticas (Tabela 7). Ambos os cenários foram simulados com duração do vazamento de 2 horas, totalizando um volume de 5600 m³ de Bunker C. As simulações determinísticas foram realizadas até a concentração de óleo na água se tornar insignificante (em função de toque na costa, evaporação e dispersão). O pior cenário de verão escolhido foi um cenário com vento Sudeste que faz todo o óleo vazado chegar à praia a partir da quinta hora após o vazamento. Como pior caso de inverno foi considerada uma condição de vento do quadrante Norte que, após o segundo dia de simulação inverte para Sul, fazendo com que o óleo se disperse para Sul e, no momento da inversão do vento a pluma de óleo muda sua orientação e passa a se dispersar em direção ao Rio Doce. Nota-se neste caso que apenas pequena quantidade de óleo entra no rio, isto ocorre devido à vazão deste que atua como uma barreira hidráulica não permitindo que grandes quantidades de óleo entrem no rio.

Os resultados das simulações são apresentados em forma de distribuição das partículas de óleo ao longo do tempo. Na Figura 33 e na Figura 34 estão apresentados os resultados de inverno e verão, respectivamente. Para o cenário de verão, são apresentados os tempos de 2, 4, 6 e 8 horas, e para o cenário de inverno, são apresentados os tempos de 1, 15, 30, 45 e 60 horas. O caso de inverno demonstra que pode ocorrer toque de óleo na costa próximo ao rio Doce, entretanto, este toque ocorre por volta de 60 horas após o vazamento (tempo máximo para a disponibilização de recursos de contenção/limpeza no local da ocorrência da descarga especificados na Resolução CONAMA nº 398/08). Para ambos os cenários, não é considerada nenhuma ação de resposta ou contenção do óleo derramado através do uso de barreiras ou dispersantes.

No cenário de verão o óleo começa a atingir a costa a partir da quinta hora. Em função da predominância dos ventos de Nordeste e correntes no mesmo sentido, o óleo se dirige diretamente para a praia. No cenário de inverno nota-se que a mancha de óleo se espalha na direção Sul, chegando a cerca de 60 km do terminal, entretanto, até a mudança nas condições ambientais, o óleo não atinge a costa. Com a mudança das condições, por volta das 30 horas, o óleo passa a migrar em direção à costa, atingindo as praias próximas à desembocadura do Rio Doce. É importante perceber que apenas pequena quantidade do óleo penetra no rio devido à descarga hídrica que se dá no sentido contrário. O rio atua protegendo a porção de praia ao norte de sua desembocadura, afastando as partículas de óleo da costa.

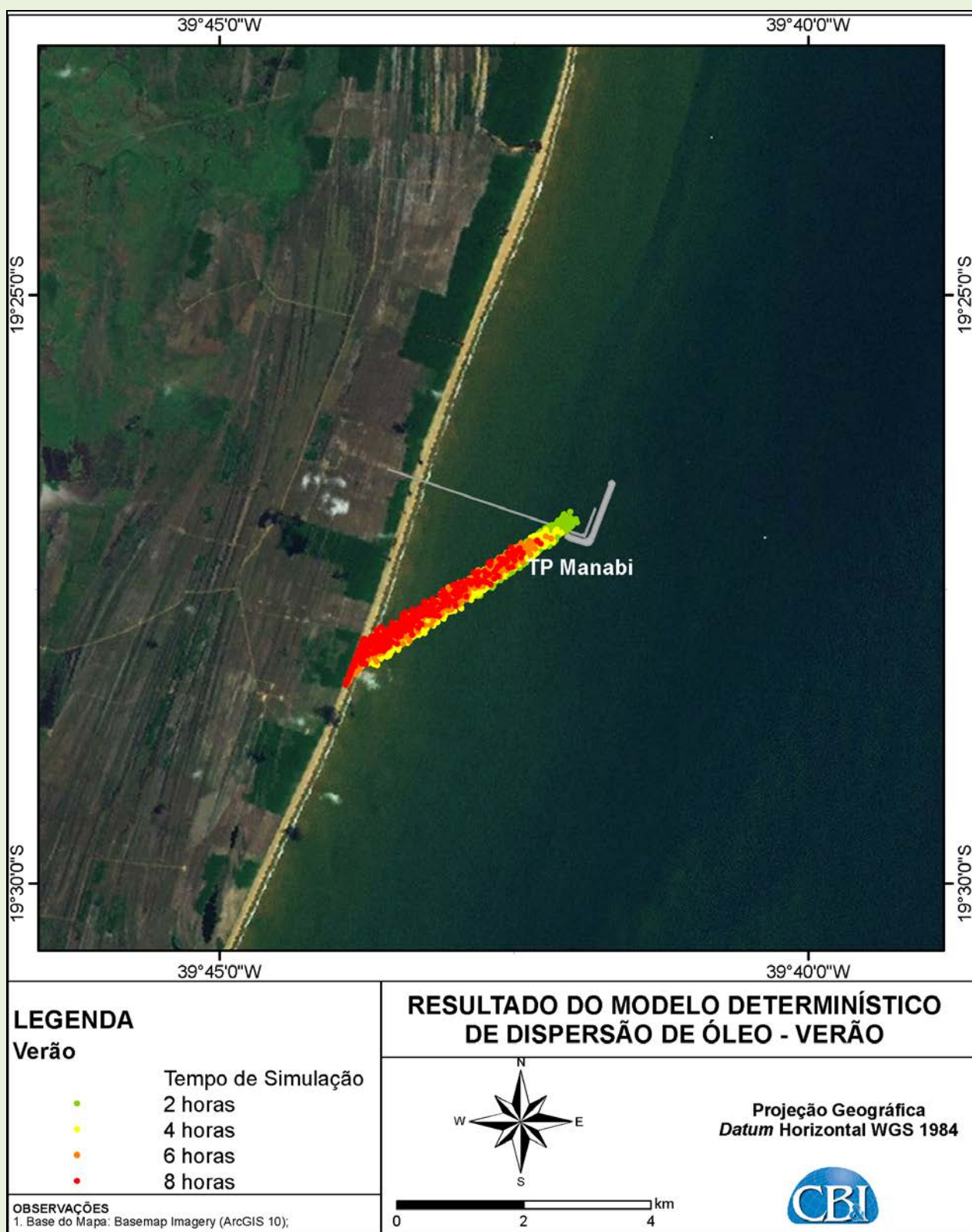


Figura 33: Inverno - Dispersão das partículas na simulação determinística de pior caso de verão.

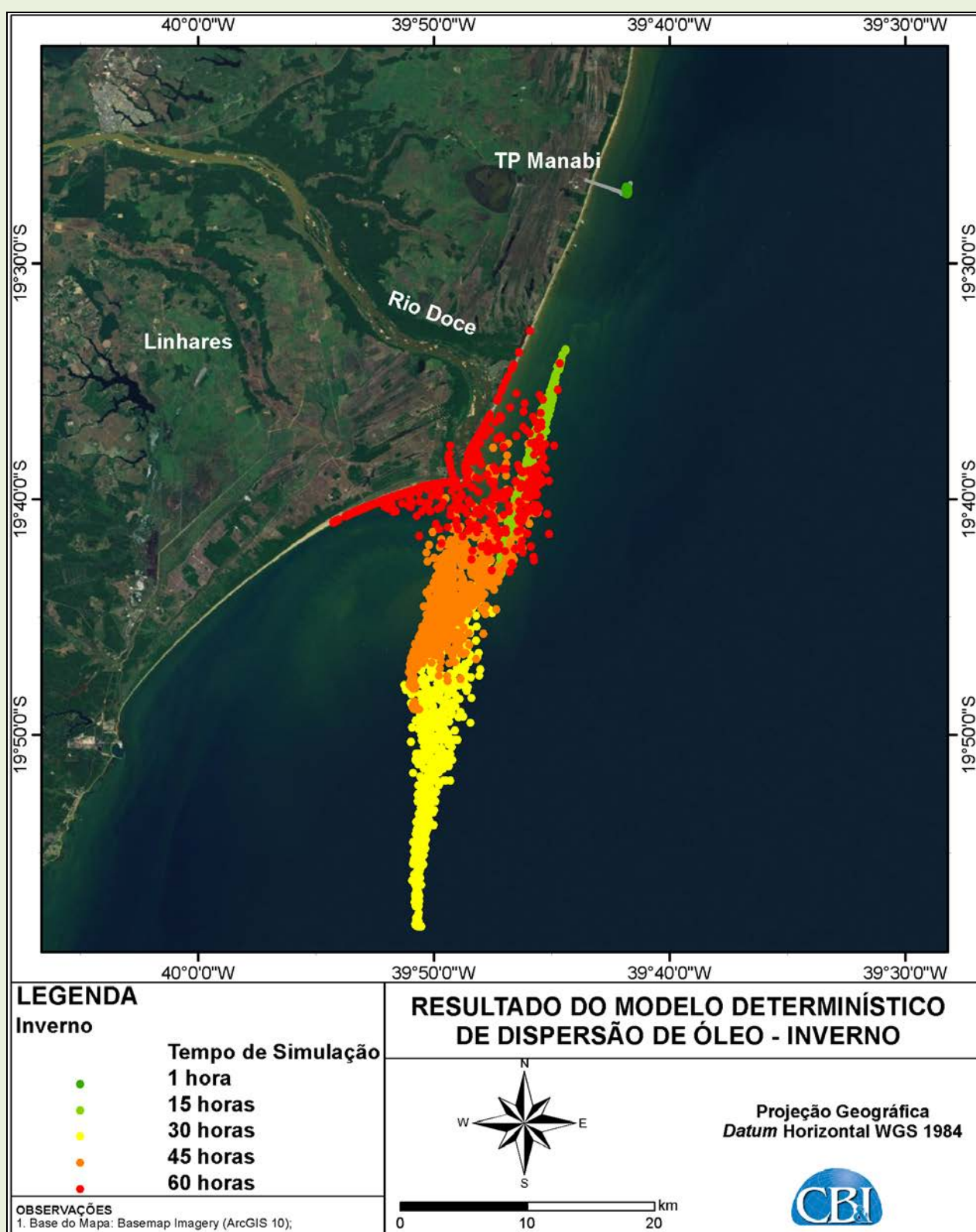


Figura 34: Verão— Dispersão das partículas na simulação determinística de pior caso de inverno.

Os resultados da evolução do derramamento de óleo ao longo do tempo para os cenários de verão e inverno são apresentados na Figura 35 e na Figura 36, respectivamente. Pode-se perceber que, embora no cenário de inverno o óleo tenha atingido uma área maior, o volume de óleo que chega à costa é bastante inferior (2000 m³ a menos) ao volume que chega à praia na simulação de pior cenário de verão. Isso se deve ao fato de que, na simulação de inverno o óleo permanece mais tempo na água (cerca de 60 horas) em relação à simulação de verão (8 horas), o que permite que um maior volume de óleo seja disperso e evaporado.

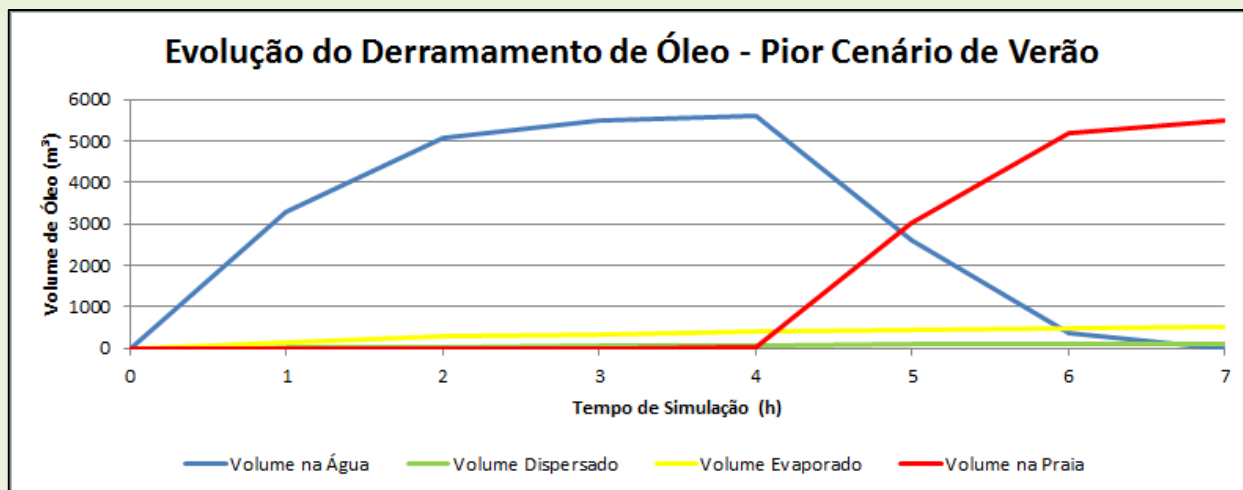


Figura 35: Verão – Balanço de massa para o cenário de pior caso de verão.

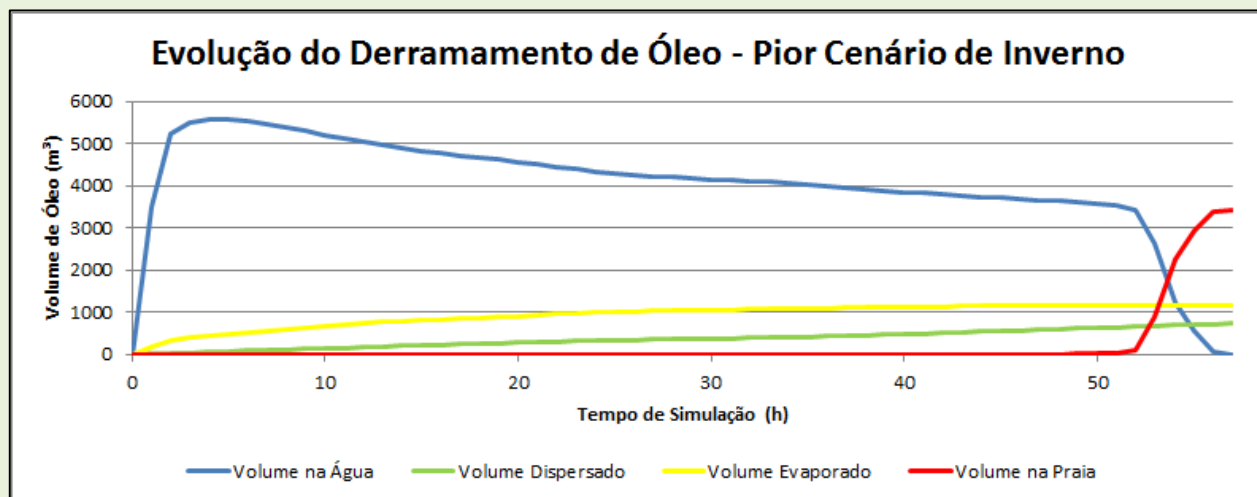


Figura 36: Inverno - Balanço de massa para o cenário de pior caso de inverno.

5 Considerações Finais

Foram conduzidas simulações de dispersão de óleo em modo probabilístico e determinístico considerando os meses de verão e inverno e suas variabilidades meteorológicas e oceanográficas para um vazamento hipotético de óleo no Porto Norte Capixaba da Manabi Mineração. As simulações foram conduzidas de acordo com os critérios estabelecidos na Resolução CONAMA nº398/2001, que define três classes de derramamento: pequeno, com um volume de até 8 m³; médio, com até 200 m³ e de pior caso, definido de acordo com as características das operações, podendo ser o rompimento do mangote, afundamento da embarcação ou perda de controle do poço (quando aplicável). O volume de pior cenário considerado foi de 5600 m³, correspondente ao afundamento e vazamento de toda capacidade de armazenamento do tanque da maior embarcação de projeto (Cape Size – 300 m). Foi considerado o óleo tipo BUNKER C e o local de vazamento definido foi na região interna do porto por estar mais próximo da costa e com maior probabilidade de vazamentos pela presença da estrutura de abrigo. Com o objetivo de se prever o pior cenário possível, não foi considerado qualquer sistema de controle ou ação de resposta aos vazamentos nas simulações, tais como uso de barreiras de contenção, skimmers e dispersantes.

Para a geração das bases hidrodinâmicas representativas dos meses de verão e inverno foi utilizado o modelo numérico Delft3D, desenvolvido pela Deltares (Delft Hydraulics - Holanda) e considerado a ferramenta mais avançada na atualidade para simulações de ambientes costeiros, estuarinos e fluviais. Para a simulação dos processos de dispersão foi utilizado o Oil Spill Information System OSIS, modelo lagrangeano que calcula os processos advectivos e dispersivos de vários tipos de óleos derramados no mar.

A partir dos resultados do modelo Delft3D, pôde-se observar a importância do Banco de Abrolhos na geração de correntes ao longo da costa. Por ser consideravelmente mais raso que as regiões adjacentes, o Banco de Abrolhos faz com que a onda de maré seja amplificada, gerando um gradiente de nível entre o Banco e as áreas adjacentes. Esse gradiente gera uma força ao longo da costa de Sul para Norte durante o período de enchente e de Norte para Sul do período de vazante. Durante períodos de sizígia a maré é o agente dominante (sobre o vento), e há inversão da corrente em função da maré (enchente ou vazante). Já em períodos de quadratura, quando a amplitude de maré é menor, o vento passa a ser dominante e influência das marés reduz a magnitude das correntes sem que haja inversão da mesma.

As bases hidrodinâmicas para os períodos de inverno e verão foram importadas para o modelo OSIS onde foram conduzidas simulações probabilísticas e determinísticas de vazamentos hipotéticos de óleo. Os resultados dos modelos probabilísticos mostram a mancha de probabilidade de dispersão do óleo para ambos os períodos, alongadas no sentido Norte-Sul no sentido predominante dos ventos e correntes.

Para o período de inverno, de uma maneira geral, para todos os volumes de vazamento a mancha de probabilidade se apresentou bastante similar, indicando, independentemente do volume de vazamento, a tendência de dispersão da mancha de óleo latitudinalmente. Para Norte, a mancha de probabilidade chega a aproximadamente 140 km, para Sul chega a 135 km, já em direção ao mar a mancha não chega a 10 km (na latitude do lançamento). Em função da entrada de frentes frias, com ventos em geral de Sul e Sudeste, nota-se que as maiores probabilidades de presença do óleo estão diretamente a Norte do empreendimento, principalmente próximos à costa, isso ocorre devido à orientação da costa e aos ventos de Sul/Sudeste que transportam o óleo para a praia. Ainda para o Norte, as manchas podem chegar a vários quilômetros do empreendimento, porém, a probabilidade de ocorrência é bastante baixa (<10%). Sob influência de ventos e correntes do sentido Norte-Sul, a mancha de probabilidade se espalha também longitudinalmente. Ao Sul do Rio Doce ocorre uma reorientação da linha de costa, e juntamente com a barreira hidráulica imposta pelo próprio Rio Doce, a probabilidade de toque do óleo na costa torna-se bastante reduzida.

As manchas de probabilidade para os volumes simulados para o período de verão foram bastante similares ao de inverno em função da grande persistência do Bunker C na água. Durante o verão, as manchas de probabilidade chegam a aproximadamente 40 km para o Norte e 80 para o Sul. Na latitude do vazamento a largura da mancha é inferior a 10 km. Entretanto, no sentido Norte, observa-se que a mancha de probabilidade que toca a costa não ultrapassa 20 km, e a probabilidade é bastante baixa (<5%) para todos os volumes de vazamento. Em função da maior frequência de ventos nordeste no verão, a mancha de probabilidade se estende para Sul do Rio Doce, com probabilidade de cerca de 30% até pouco mais de 30 km ao sul do Rio. Entre o Rio Doce e o empreendimento, são encontradas as maiores probabilidades de dispersão de óleo próxima à costa (entre 30 e 75%).

A partir dos modelos probabilísticos, foram selecionados dois piores casos para a simulação determinística, um para o período de inverno e outro para o verão. No cenário de verão, o vento Nordeste transporta o óleo diretamente para a praia, sendo que em 8 horas a quantidade de óleo na água já é insignificante (a maior parte do óleo está na costa). No cenário de inverno a mancha de óleo se espalha na direção Sul, chegando a cerca de 60 km do terminal e, com a mudança das condições meteorológicas, por volta das 30 horas após o vazamento o óleo passa a migrar em direção à costa, atingindo as praias próximas à desembocadura do Rio Doce. É importante perceber que apenas pequena quantidade do óleo penetra no rio devido à descarga hídrica que se dá no sentido contrário. O rio atua protegendo a porção de praia ao norte de sua desembocadura, afastando as partículas de óleo da costa.

Os resultados da evolução do derramamento de óleo ao longo do tempo para os cenários de inverno e verão mostram que, embora no cenário de inverno o óleo tenha atingido uma área maior, o volume de óleo que chega à costa é bastante inferior (2000 m³ a menos) ao volume que chega à praia no pior cenário de verão. Isso se deve ao fato de que, na simulação de inverno o óleo fica mais tempo na água (cerca de 60 horas) em relação à simulação de verão (8 horas), o que permite que um maior volume de óleo seja disperso e evaporado.

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

6 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.

BLOKKER, P.C., 1964. Spreading and evaporation of petroleum products on water. Antwerp: in Proceedings of the Ninth International Harbour Conference.

CEPAL, 2011. Efectos del Cambio Climático em la Costa de América Latina y Caribe – Dinámicas, Tendencias y Variabilidad Climática. UNESCO, 265 p. 2011.

CONAMA (2008). Resolução nº 398 de 11/06/2008. Brasília: Diário Oficial da União.

CPTEC, 2012. Média Sazonal da Temperatura do Ar. Disponível em: www.cptec.inpe.br/clima. Acessado em: 1º nov. 2012.

EGBERT, G. D. e EROFEEVA, S. Y., 2002. Efficient Inverse Modeling of Barotropic 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.

ELLIOTT, A.J., HURFORD, N. and PENN, C.J., 1986. Shear Diffusion and the Spreading of Oil Slicks. Mar.Pollut. Bull., 17 (7), 308-313.

FAY, J.A., 1971. Physical Processes in the Spread of Oil on a Water Surface. Washington D.C.: in Proceedings of the Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills, pp 463-468, American Petroleum Institute.

FEMAR, 2000. Catálogo de estações maregráficas brasileiras, Folhas 159 e 160. Disponível em: <http://www.fundacaofemar.org.br>. Acessado em: 22 mar. 2012.

FORRESTER, W.D, 1986. Distribution of suspended oil particles following the grounding of the oil tanker Arrow. J. Mar. Res. 29,151-170.

LEHR, W.J., FRAGA, R.J., BELEN, M.S. and CEKIRGE, H.M., 1984. A New Technique to Estimate Initial Spill Size Using a Modified Fay-type Spreading Formula. Mar. Pollut. Bull., 15 (9), 326-329.

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

LUNEL T., 1993. Dispersion. Oil droplet size measurements at sea. pp 1023-1056. Proceedings 16th Arctic and Marine Oil Spill Technical Seminar. Environment Canadá.

MODIS-Terra, 2012. Média Sazonal da Temperatura da Superfície do Mar. Disponível em: <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>. Acessado em: 1º nov. 2012.

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

PETROBRAS, 2011. Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico (FISPQ). Produto: Óleo Combustível Marítimo BUNKER C. Nº FISOQ: BR0350. 10 p.

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

THORPE S.A., 1984. On the determination of Kv in the near-surface ocean from acoustic measurements of bubbles. J. Phys. Oceanogr. 14, 855-863.

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