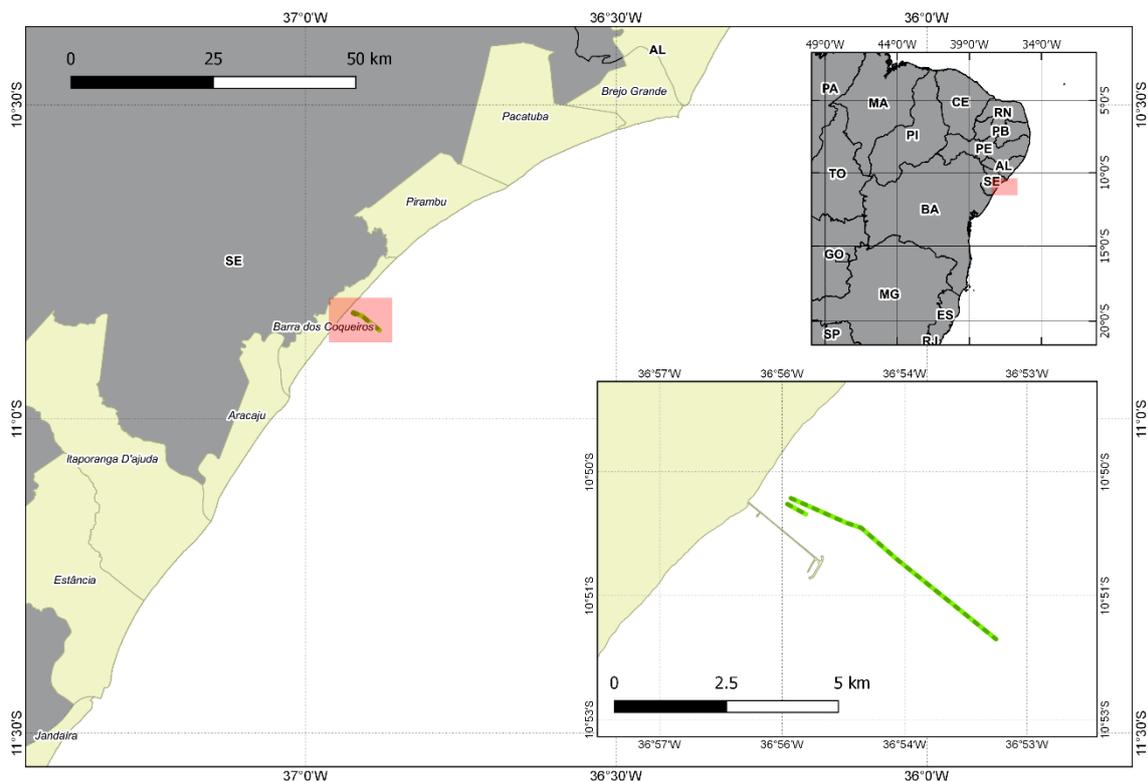


## I. INTRODUÇÃO

Foi executado o estudo da modelagem das possíveis alterações da morfologia costeira ao longo das tubulações do gasoduto, da adutora e do emissário, os quais serão implantados na praia do Jatobá, localizado no município de Barra dos Coqueiros.

O objetivo principal deste estudo é verificar, por meio de modelagem numérica computacional, se os dutos que serão instalados podem alterar a morfologia do fundo mar em suas imediações.

A localização proposta para o empreendimento considera dos dutos presentes a partir da isóbata de 5 m, medida esta adotada em decorrência à ausência do projeto de engenharia em relação ao trecho anterior à essa batimetria, pode ser vista na **Figura 1**. Como se observa nesta Figura, para efeitos de imagem, dada a escala de apresentação, os dutos do emissário e da adutora são representados por uma linha apenas, sendo referenciados doravante, ao longo do presente estudo, como “emissário”.



**Figura 1** – Localização do gasoduto e emissário (linhas tracejadas em verde) na costa de Aracaju/SE. Está apresentado somente o trecho em profundidade acima de 5 m, onde o gasoduto e emissário serão assentados sobre o assoalho marinho.

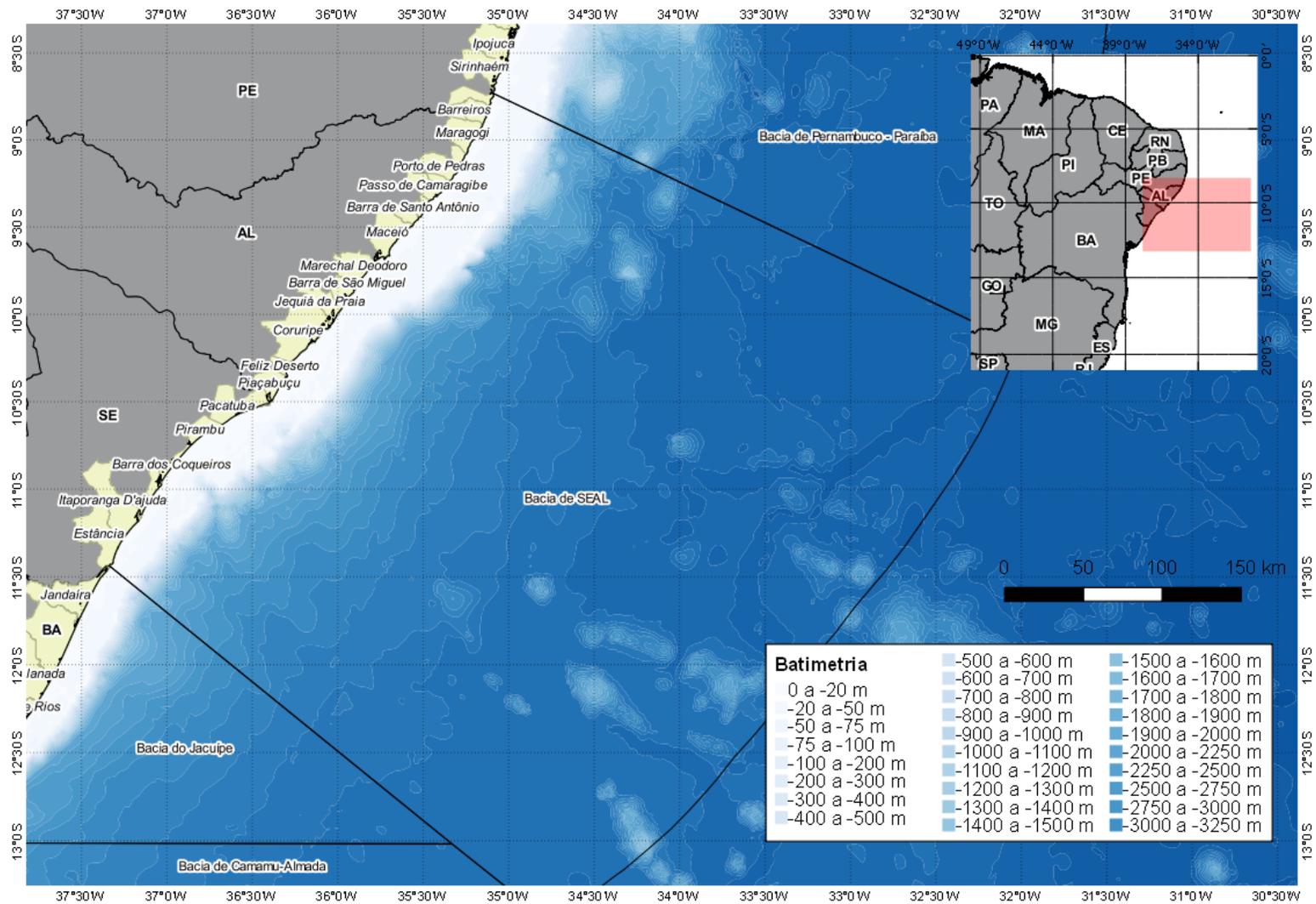
É feita uma breve descrição da oceanografia regional dos parâmetros pertinentes a este estudo. Em sequência são apresentadas as metodologias utilizadas para o desenvolvimento deste estudo, bem como os cenários computacionais simulados. Os resultados e as discussões destes cenários computacionais finalizam o trabalho.

## **II. DESCRIÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO**

Nesta seção são descritas as características da região, relevantes para este estudo, englobando primeiramente a Plataforma Continental da Bacia Sergipe-Alagoas, dando enfoque em seguida para a região onde o gasoduto e os emissários serão instalados. Chegando aos padrões atmosféricos que influenciam a circulação nesta região e, por fim, o padrão de ondas local.

### **II.1 A PLATAFORMA CONTINENTAL DA BACIA SERGIPE ALAGOAS**

A Bacia Sergipe-Alagoas (SEAL) está centrada em 11°S e se localiza na porção norte da Margem Continental Leste-Nordeste Brasileira na borda oeste do Oceano Atlântico Tropical (**Figura 2**).

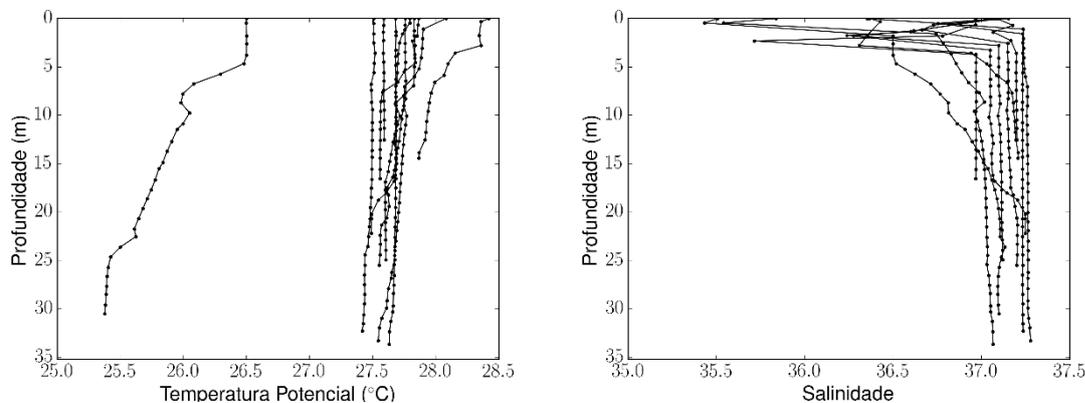


**Figura 2** – Localização da Bacia Sergipe-Alagoas (SEAL).

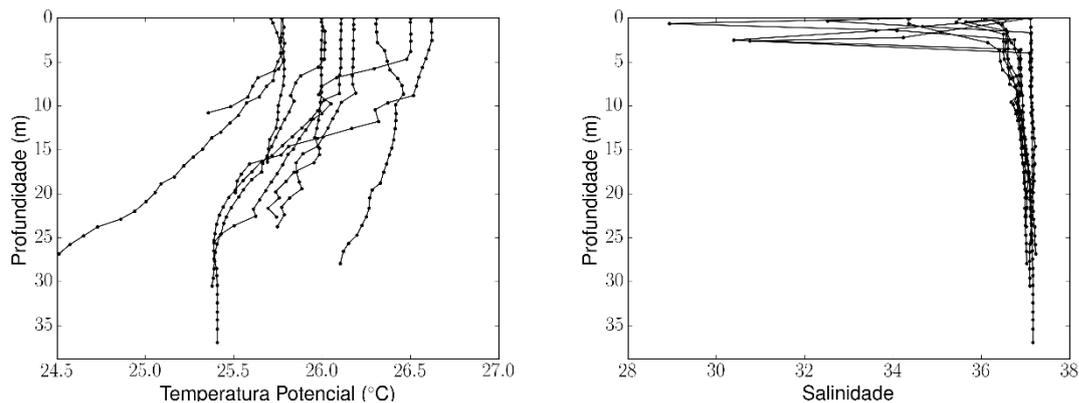
A Plataforma Continental da SEAL (PCSEAL) se estende por cerca de 370 km, com uma orientação aproximadamente 40° no sentido horário em relação ao norte geográfico. Define-se a PCSEAL como uma plataforma continental estreita, com largura de cerca de 18 km no extremo sul e 42 km no extremo norte. A maior parte da sua região não ultrapassa os 40 m de profundidade, com topografia significativamente acidentada (SUMMERHAYES *et al*, 1976 *apud* PARENTE, 2016).

Na porção do Atlântico Sudoeste Tropical, onde está inserida a PCSEAL, encontra-se, em geral, uma estrutura de massas de águas formada pelo empilhamento, da superfície até o fundo, das massas de água: Água tropical, Água Central do Atlântico Sul, Água Intermediária Antártica, Água Circumpolar Superior, Água Profunda do Atlântico Norte, Água Circumpolar Inferior e Água de Fundo Antártica (MÉMERY *et al*, 200, REID, 1989). Contudo, Parente (2016) analisando dados de hidrografia coletados no ano de 2014 (duas campanhas – maio e novembro) na PCSEAL observou águas praticamente homogêneas – tanto para a temperatura quanto para a salinidade, em ambas campanhas, com valores médios de 27 °C para a temperatura e 37 para a salinidade - **Figura 3**.

Maio/2014



Novembro/2014



**Figura 3** – Dados de temperatura (esquerda) e salinidade (direita) em maio (superior) e novembro (inferior) de 2014 ao longo da Plataforma Continental de SEAL.

Fonte: modificado de Parente (2016).

Em campanha realizada em 16/05/2017 na região de instalação do gasoduto e emissário, também foram obtidos dados homogêneos de temperatura e salinidade ao longo da coluna d'água. Os dados de temperatura oscilaram entre 27,9 °C e 28,7°C e a salinidade entre 32,5 e 33,4 -**Tabela 1**.

**Tabela 1** – Temperatura e salinidade medidos na região do gasoduto e emissário em 16/05/2017.

	Profundidade (m)	Temperatura (°C)	Salinidade
Pt1	16,25	27,9	33,4
	10,83	27,9	33,2
	5,41	28,1	32,7
	0,44	28,4	32,7
Pt2	3,83	28,6	32,5
	1,91	28,7	33,4
	0,44	28,7	32,8

Com relação às correntes, Parente (2019) analisou o conjunto de dados de três fundeios instalados na PCSEAL, com destaque para o fundeio intitulado PCM-9, que coletou dados entre 19/03/2012 e 17/06/2015 em região nas proximidades de Aracajú. Os outros dois conjuntos de correntógrafos foram instalados em região mais ao sul.

O fundeio PCM-9 foi posicionado a uma profundidade de 23 m, com medições a 10 m de profundidade. O autor cita que para este fundeio as correntes apresentaram intensidade média de 0,20 m/s, com desvio padrão de 0,12 m/s, com direção preferencial das correntes paralela a costa (sentido preferencial SSW) e com direções perpendiculares a costa escassas.

## II.2 PADRÕES ATMOSFÉRICOS SOBRE A BACIA SERGIPE ALAGOAS

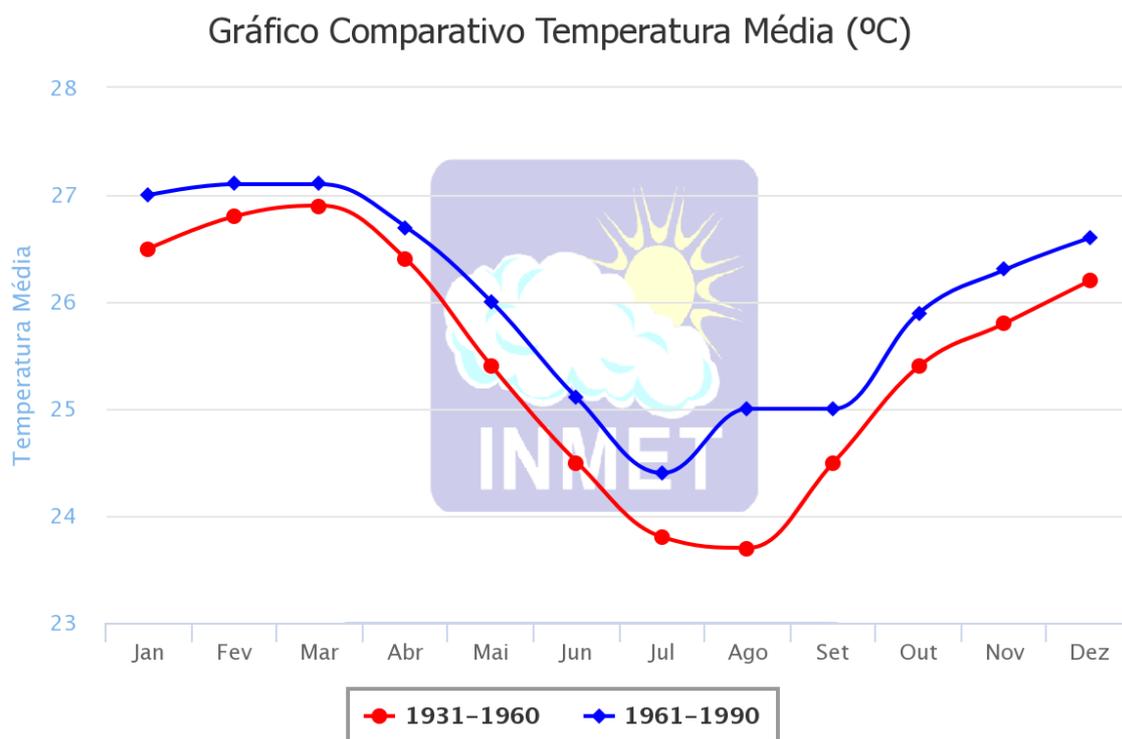
Como mencionado anteriormente, a SEAL situa-se na região Nordeste do Brasil (NEB) aproximadamente entre os paralelos 10 e 12°S e os meridianos 35,5 e 37,5° W, numa região equatorial oceânica adjacente ao estado de Sergipe, abrangendo também o sul do Estado de Alagoas.

Três tipos de clima podem ser identificados na região Nordeste: um clima litorâneo úmido (que se estende do litoral da Bahia ao do Rio Grande do Norte), um clima tropical (em áreas dos estados da Bahia, Ceará, Maranhão e Piauí) e um clima tropical semiárido (em todo o sertão nordestino). Essa diversidade de climas deve-se à atuação de diversos mecanismos físicos que interagem e são responsáveis pela distribuição das chuvas, pelas variações da nebulosidade e do vento na região (PETROBRAS, 2016). Os principais fatores dinâmicos de larga escala que determinam o clima no Nordeste (NEB) são (i) o posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que depende (ii) da intensidade e do posicionamento do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e do Anticiclone Subtropical do Atlântico Norte (ASAN), conseqüentemente, modificando o padrão de ocorrência (iii) dos ventos alísios e das precipitações na região. Somam-se a estes os sistemas sinóticos e de mesoescala, causadores de perturbações no padrão climático ditado pela ZCIT que podem ser externos ou internos à região e agir de forma isolada ou sinérgica, causando eventos extremos na região de estudo (PETROBRAS, 2016).

A precipitação é a variável meteorológica mais importante quando se estuda o NEB em função de suas conseqüências socioeconômicas, notadamente com relação ao abastecimento hídrico urbano,

agricultura, pecuária e diversas atividades industriais ao se adentrar no continente, notadamente na região do sertão, mais distante do litoral. Por esta razão, em geral os trabalhos científicos sobre o NEB remetem a esta variável (PETROBRAS, 2016).

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e as normais climatológicas para a estação de Aracaju (estação código 83096), a temperatura média anual, o mês mais quente é o de março (27,1 °C 1961-1990 e 26,9 °C 1931-1960), e o mais frio julho (23,8 °C 1961-1990) ou agosto (23,7 °C 1931-1960) - **Figura 4**. Assim, é possível concluir que a amplitude térmica na região é de aproximadamente 3,5 °C, que é relativamente baixa.

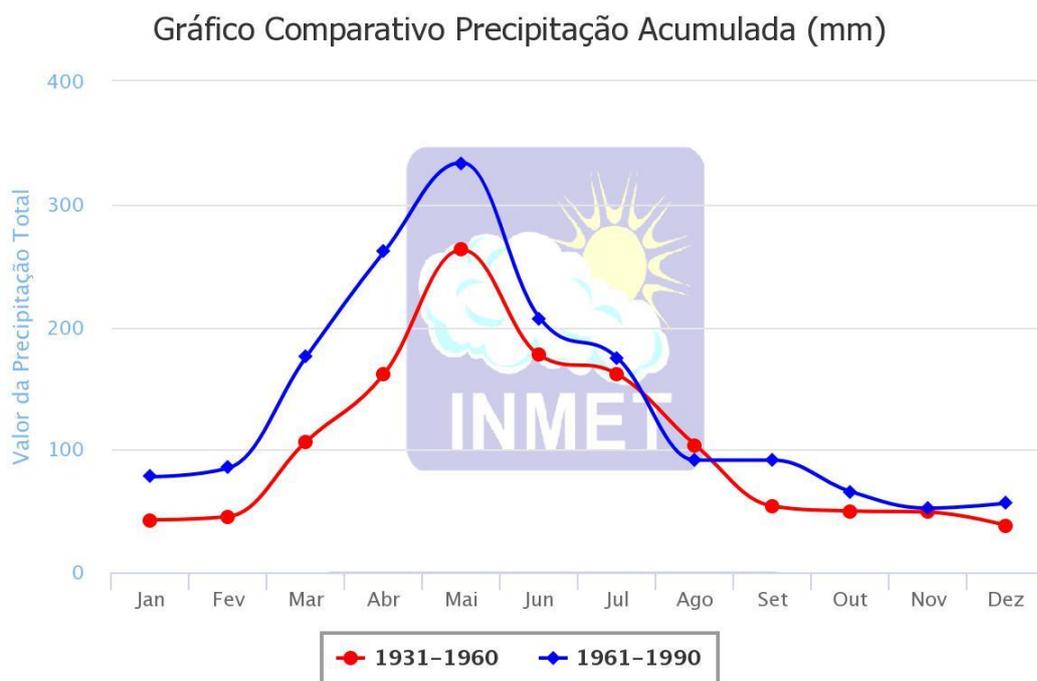


**Figura 4** – Variação climatológica da temperatura para o município de Aracajú, entre 1931 e 1990.

Fonte: INMET.

Entretanto, de acordo com o INMET na mesma estação, a pluviosidade varia desde os valores mínimos em dezembro (38,3 mm – 1931-1960; 56,3 mm 1960-1991) e valores máximos maio (262,70 mm – 1931-1960; 333,80 mm – 1960-1991), tendo amplitudes máximas anuais de 277,5 mm (1960-1991) - **Figura 5**. Assim, é possível identificar duas estações extremas e uma intermediária:

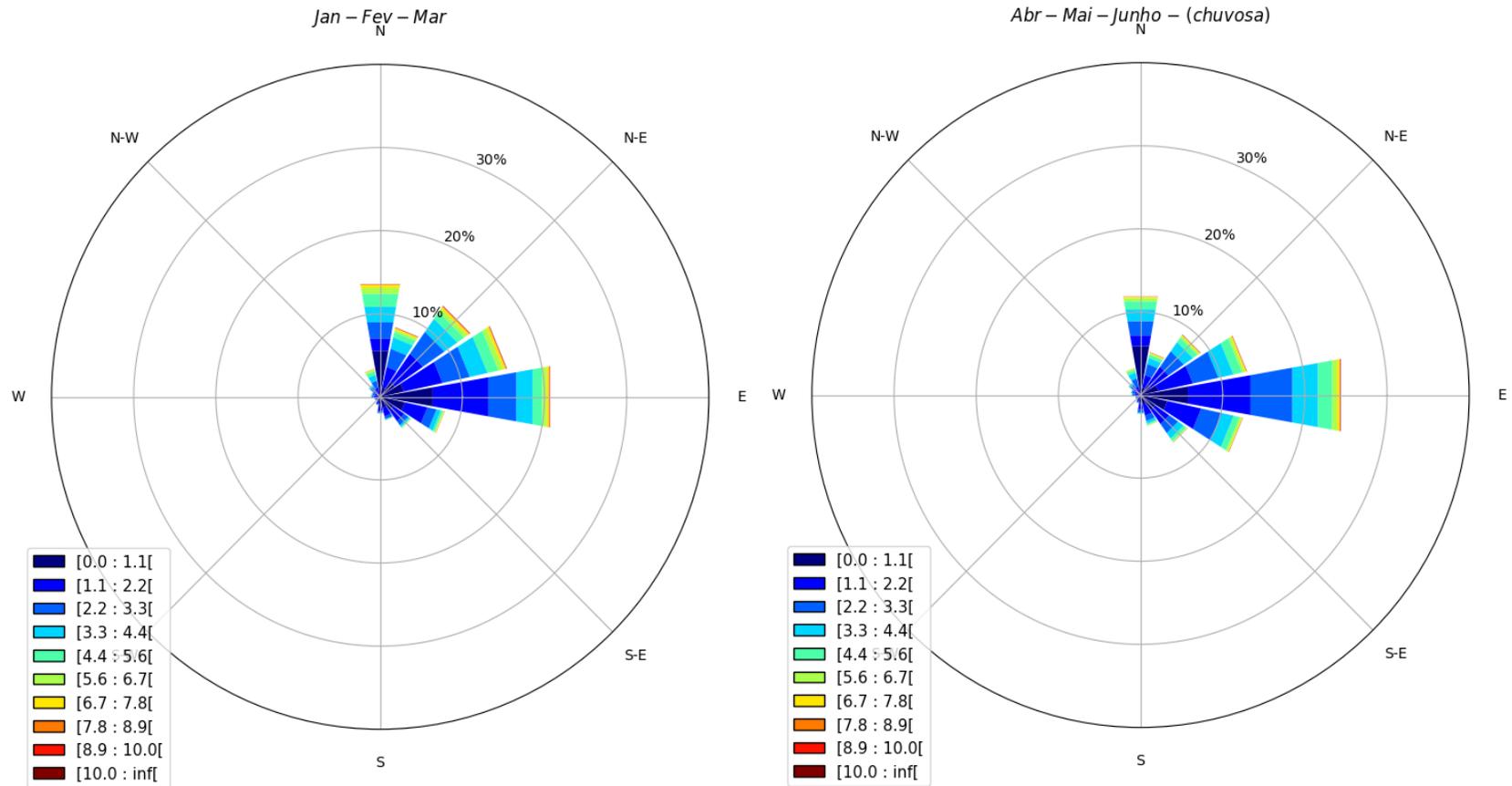
- Seca: outubro, novembro e dezembro
- Chuvosa: abril, maio e junho
- Transição: janeiro, fevereiro e março; julho, agosto e setembro.



**Figura 5** – Variação climatológica da pluviosidade acumulada para o município de Aracajú, entre 1931 e 1990.

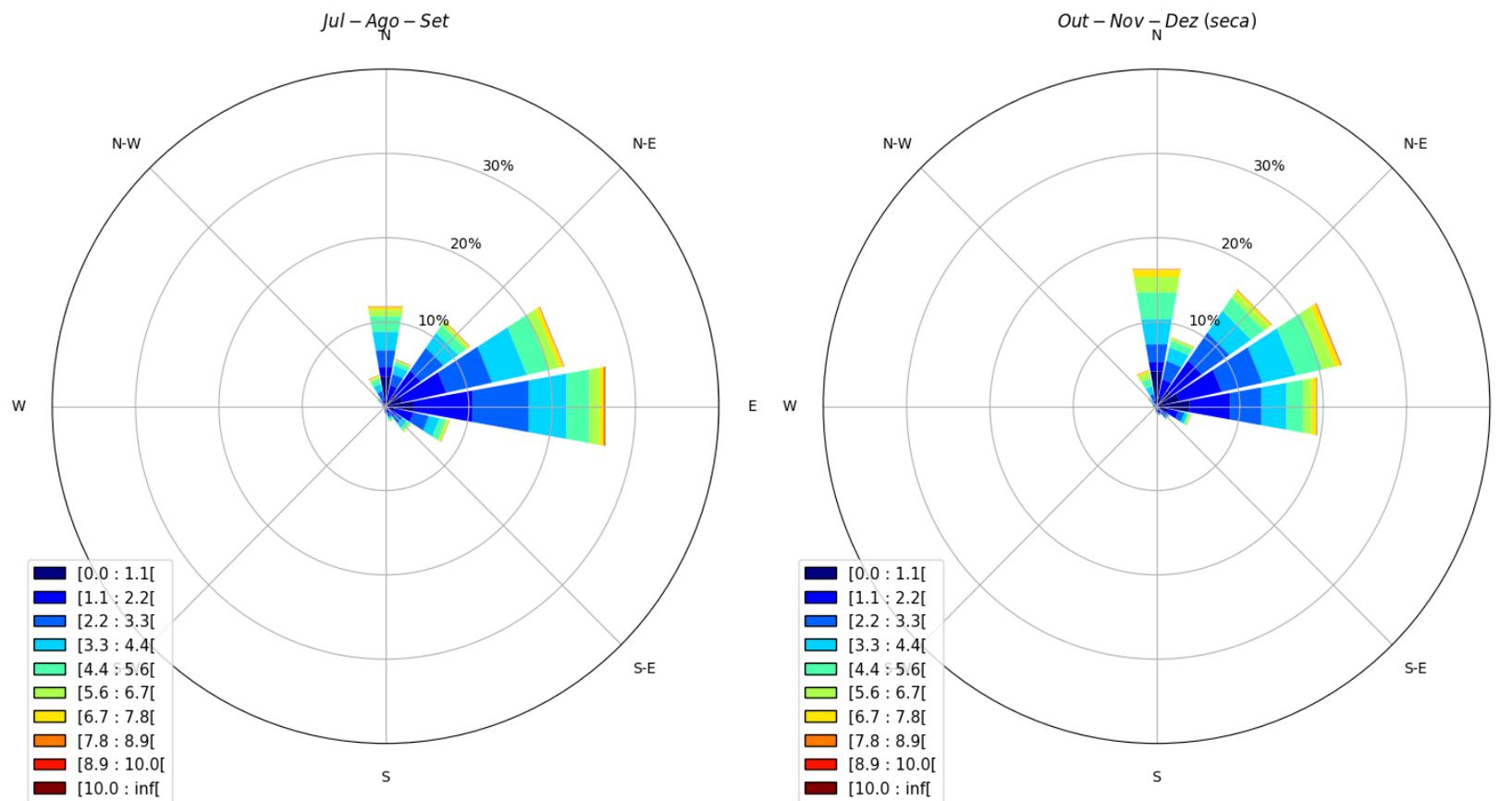
Fonte: INMET.

Para analisar a variação dos ventos nestas estações, foram obtidos dados de vento do aeroporto de Aracaju (METAR), do período entre 1997 e 2016, com medições horárias. O aeroporto de Aracajú está localizado na latitude: 10° 59'S, longitude: 37° 04'W a uma altura de 8 m. As rosas dos ventos para os períodos de transição e estações seca e chuvosas estão na **Figura 6** e na **Figura 7**. Nestas figuras é possível notar que na época chuvosa os ventos provenientes de leste são os mais frequentes, com influências de sudoeste e nordeste significativas. Já para a época de seca, os ventos de nordeste são os mais frequentes, com pouca frequência de ocorrência dos ventos do quadrante sudoeste. Nota-se também que no período de seca os ventos possuem maiores intensidades que no período chuvoso.



**Figura 6** – Rosa dos ventos para os meses de janeiro, fevereiro e março (esquerda) e abril, maio e junho (direita), para o aeroporto de Aracajú entre 1997 e 2016.

Fonte: Metar.



**Figura 7** – Rosa dos ventos para os meses de julho, agosto e setembro (esquerda) e outubro, novembro e dezembro (direita), para o aeroporto de Aracajú entre 1997 e 2016.

Fonte: Metar.

### II.3 REGIME DE ONDAS NA BACIA SERGIPE ALAGOAS

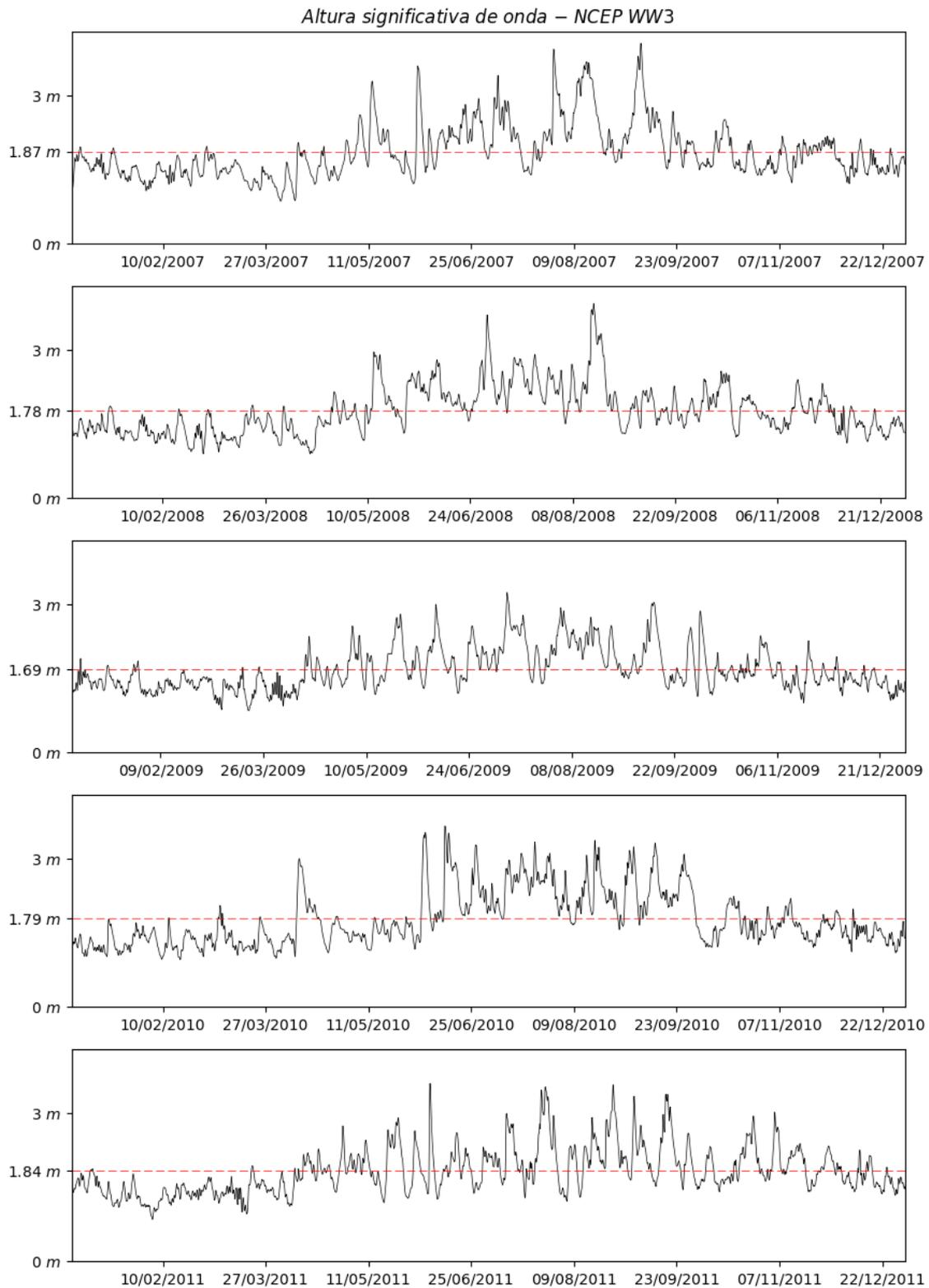
Para descrever o regime de ondas na bacia Sergipe-Alagoas foram utilizados dados provenientes do modelo global Wave Watch III do NCEP. Foram obtidos dados entre os anos de 01/01/2007 e 31/12/2016, com resolução de 3 horas, para o ponto localizado na posição longitude 36,5 °W e latitude 11,0°S, distante cerca de 50 km do local onde serão instalados o gasoduto e o emissário. A **Figura 8** e a **Figura 9** mostram a série de altura significativa de onda para este conjunto de dados. A **Tabela 2** mostra as estatísticas básicas de altura e período para esta série, contemplando tanto período total quanto as épocas sazonais.

**Tabela 2** – Estatística básica para a série de ondas ao largo do litoral de Aracajú/SE para o período entre 2007 e 2016.

Época do ano	Altura (m)				Período (s)			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Anual	1,77	0,78	4,19	0,49	8,93	4,35	20,45	2,27
Janeiro - Fevereiro - Março	1,41	0,78	2,33	0,22	8,24	4,46	17,86	2,28
Abril - Maio - Junho (Estação Chuvosa)	1,79	0,83	4,05	0,50	9,73	4,35	20,45	2,49
Julho - Agosto - Setembro	2,16	1,06	4,19	0,52	9,33	5,73	19,66	1,95
Outubro - Novembro - Dezembro (Estação Seca)	1,70	0,95	3,86	0,35	8,42	4,37	18,78	1,99

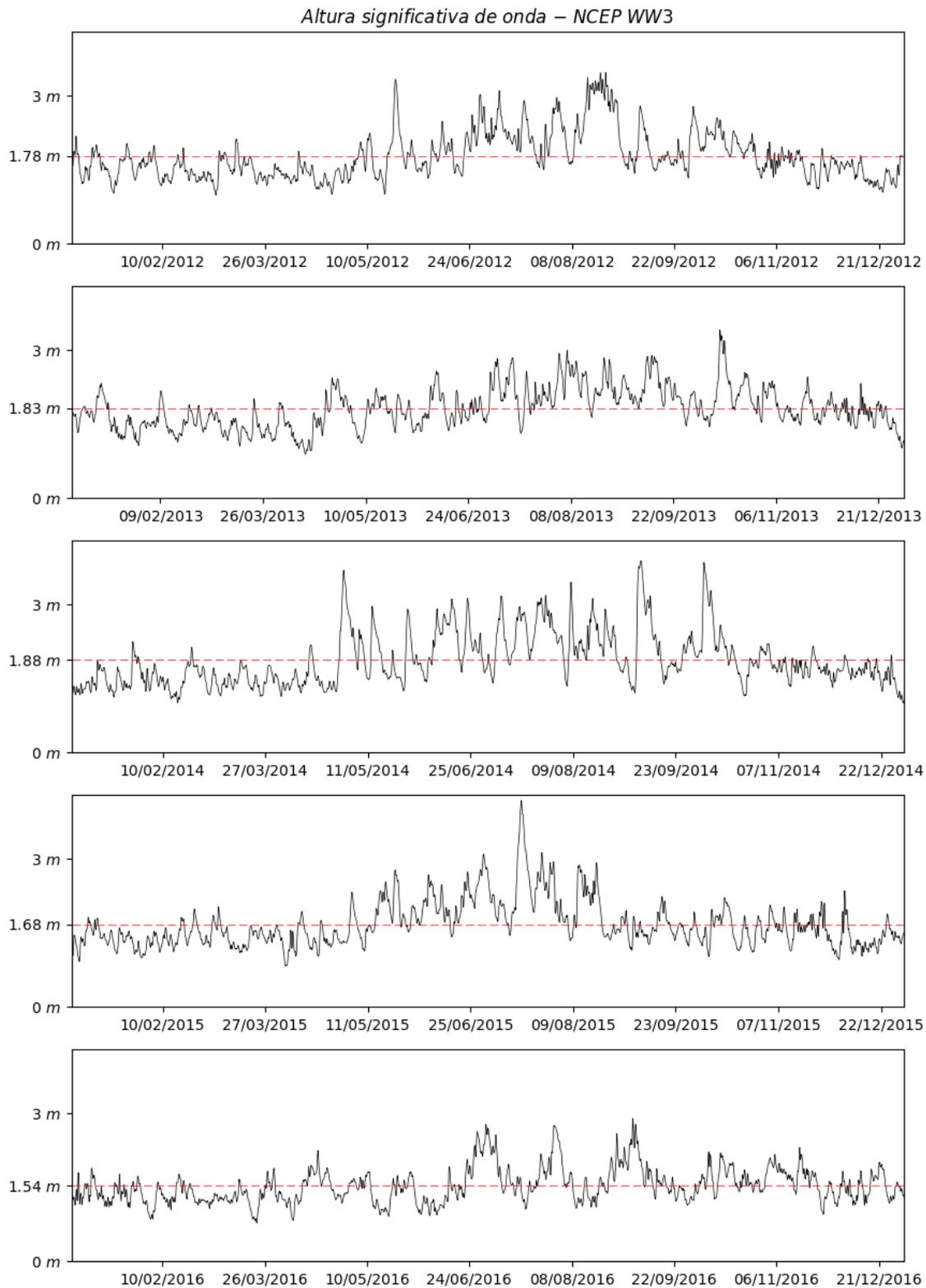
Fonte: WaveWatch3 – NCEP.

A **Tabela 2** mostra que a altura média de onda anual é de 1,77 m e período médio de 8,93 s. Com relação a sazonalidade, observa-se que o período entre julho a setembro é o que possui a maior altura significativa média, com 2,16 m. Já as ondas com maior período médio foram observadas na estação chuvosa (entre abril e junho), com 9,73. A época do ano com a menor altura média é a de janeiro-março, com 1,41 m. Esta época do ano é também a com menor período médio, com 8,24 s.



**Figura 8** – Altura significativa de onda ao largo da costa de Aracajú entre 2007 (superior) e 2011 (inferior). As linhas tracejadas vermelhas mostram o valor médio anual.

Fonte: WaveWatch3 – NCEP.



**Figura 9** – Altura significativa de onda ao largo da costa de Aracajú entre 2012 (superior) e 2016 (inferior). As linhas tracejadas vermelhas mostram o valor médio anual.

Fonte: WaveWatch3 – NCEP.

Da **Tabela 3** à **Tabela 7** são apresentados os histogramas de distribuição conjunta de altura e direção de onda entre os anos de 2007 e 2016 ao largo do litoral de Aracajú/SE.

**Tabela 3** – Histograma de altura e direção de onda ao largo do litoral de Aracajú/SE para o período entre 2007 e 2016.

Anual										
Altura (m)	Direção								Observações	Frequência (%)
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
0,00 - 0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
0,50 - 1,00	0	0	149	78	29	0	0	0	256	0,79
1,00 - 1,50	0	34	5230	3013	2235	0	0	0	10512	32,57
1,50 - 2,00	0	57	6313	3521	2965	0	0	0	12856	39,83
2,00 - 2,50	0	19	2513	1854	1224	0	0	0	5610	17,38
2,50 - 3,00	0	0	785	952	488	0	0	0	2225	6,89
3,00 - 3,50	0	0	113	387	151	0	0	0	651	2,02
3,50 - 4,00	0	0	25	75	56	0	0	0	156	0,48
>4,00	0	0	5	5	0	0	0	0	10	0,03
Observações	0	110	15133	9885	7148	0	0	0	32276	
Frequência (%)	0,0	0,3	46,9	30,6	22,2	0,0	0,0	0,0		100,0

Fonte: WaveWatch3 – NCEP.

**Tabela 4** – Histograma de altura e direção de onda ao largo do litoral de Aracajú/SE para o período entre 2007 e 2016, para os meses de janeiro-fevereiro-março.

Janeiro - Fevereiro – Março										
Altura (m)	Direção								Observações	Frequência (%)
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
0,00 - 0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
0,50 - 1,00	0	0	82	38	6	0	0	0	126	1,58
1,00 - 1,50	0	22	2687	1530	1037	0	0	0	5276	66,14
1,50 - 2,00	0	16	1114	885	475	0	0	0	2490	31,21
2,00 - 2,50	0	0	31	41	13	0	0	0	85	1,07
2,50 - 3,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
3,00 - 3,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
3,50 - 4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
>4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
Observações	0	38	3914	2494	1531	0	0	0	7977	
Frequência (%)	0,0	0,5	49,1	31,3	19,2	0,0	0,0	0,0		100,0

Fonte: WaveWatch3 – NCEP.

**Tabela 5** – Histograma de altura e direção de onda ao largo do litoral de Aracajú/SE para o período entre 2007 e 2016, para os meses de janeiro-fevereiro-março.

Abril - Maio - Junho (Estação Chuvosa)										
Altura (m)	Direção								Observações	Frequência (%)
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
0,00 - 0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
0,50 - 1,00	0	0	63	37	23	0	0	0	123	1,53
1,00 - 1,50	0	12	649	994	698	0	0	0	2353	29,26
1,50 - 2,00	0	7	948	1041	1244	0	0	0	3240	40,29
2,00 - 2,50	0	0	475	537	555	0	0	0	1567	19,49
2,50 - 3,00	0	0	136	225	207	0	0	0	568	7,06
3,00 - 3,50	0	0	1	58	88	0	0	0	147	1,83
3,50 - 4,00	0	0	0	16	25	0	0	0	41	0,51
>4,00	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0,02
Observações	0	19	2272	2910	2840	0	0	0	8041	
Frequência (%)	0,0	0,2	28,3	36,2	35,3	0,0	0,0	0,0		100,0

Fonte: WaveWatch3 – NCEP.

**Tabela 6** – Histograma de altura e direção de onda ao largo do litoral de Aracajú/SE para o período entre 2007 e 2016, para os meses de janeiro-fevereiro-março.

Julho - Agosto – Setembro										
Altura (m)	Direção								Observações	Frequência (%)
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
0,00 - 0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
0,50 - 1,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
1,00 - 1,50	0	0	371	137	177	0	0	0	685	8,43
1,50 - 2,00	0	0	1464	635	483	0	0	0	2582	31,76
2,00 - 2,50	0	0	1364	933	485	0	0	0	2782	34,22
2,50 - 3,00	0	0	624	654	245	0	0	0	1523	18,74
3,00 - 3,50	0	0	112	276	58	0	0	0	446	5,49
3,50 - 4,00	0	0	25	55	23	0	0	0	103	1,27
>4,00	0	0	5	3	0	0	0	0	8	0,10
Observações	0	0	3965	2693	1471	0	0	0	8129	
Frequência (%)	0,0	0,0	48,8	33,1	18,1	0,0	0,0	0,0		100,0

Fonte: WaveWatch3 – NCEP.

**Tabela 7** – Histograma de altura e direção de onda ao largo do litoral de Aracajú/SE para o período entre 2007 e 2016, para os meses de janeiro-fevereiro-março.

Outubro - Novembro - Dezembro (Estação Seca)										
Altura (m)	Direção								Observações	Frequência (%)
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
0,00 - 0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
0,50 - 1,00	0	0	4	3	0	0	0	0	7	0,09
1,00 - 1,50	0	0	1523	352	323	0	0	0	2198	27,04
1,50 - 2,00	0	34	2787	960	763	0	0	0	4544	55,90
2,00 - 2,50	0	19	643	343	171	0	0	0	1176	14,47
2,50 - 3,00	0	0	25	73	36	0	0	0	134	1,65
3,00 - 3,50	0	0	0	53	5	0	0	0	58	0,71
3,50 - 4,00	0	0	0	4	8	0	0	0	12	0,15
>4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
Observações	0	53	4982	1788	1306	0	0	0	8129	
Frequência (%)	0,0	0,7	61,3	22,0	16,1	0,0	0,0	0,0		100,0

Fonte: WaveWatch3 – NCEP.

Os histogramas direcionais de onda mostram que, de forma anual, aproximadamente 47% das ondas possuem direção de origem E em 73% se encontram com altura significativa entre 1,0 e 2,0 m. A segunda direção com maior incidência de ondas é a SE, com 31% de frequência.

Para o trimestre de janeiro a março as ondas de E representam aproximadamente 49% da frequência de ocorrência, e alturas entre 1,0 e 1,5 m ocorrem em 66% do tempo.

Na estação chuvosa (abril a junho), as ondas de S e SE representam 71% das amostragens e ondas entre 1,5 e 2,0 m são mais comuns em 40% do tempo.

Os meses de julho-setembro são similares ao primeiro trimestre do ano na questão de direção, com 49% das observações provenientes de E. Já as alturas são maiores, com 34% ocorrendo com valores entre 2,0 e 2,5 m.

O último semestre do ano é o que apresenta a maior frequência de ocorrência em uma única direção – 61% para onde de E. Nesta época do ano as ondas possuem altura significativa entre 1,5 m e 2,0 m em 56% do tempo.

### III.METODOLOGIA UTILIZADA

#### III.1 ETAPAS DA MODELAGEM NUMÉRICA

Admitiu-se que o emissário e o gasoduto possuem diâmetro de 1,0 m e, desta maneira, devido à reduzida escala, optou-se por fazer modelagens morfológicas para três trechos específicos dos dutos, nas profundidades de 20, 13 e 6 m. Tais grades e pontos são mostrados no item III.4 a seguir.

As modelagens nestes três trechos foram realizadas tendo como dados produzidos por modelagens regionais – tanto hidrodinâmica quanto de ondas.

Assim, primeiramente, é realizada a modelagem hidrodinâmica da região. A modelagem hidrodinâmica simula as correntes na região que variam com o tempo e com as forçantes envolvidas. Paralelamente é realizada, de forma regional, a modelagem de ondas, que calcula a altura, período e direção de ondas no domínio selecionado. Por fim, tantos os resultados hidrodinâmicos quanto de ondas são inseridos como forçantes no modelo morfológico para obtenção da variação do relevo nas imediações do gasoduto e emissário.

#### III.2 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Para o estudo hidrodinâmico da região de interesse foi empregada a suíte computacional DELFT3D totalmente modular desenvolvida pela WL | Delft Hydraulics, Holanda (DELTARES, 2010).

O modelo hidrodinâmico, denominado DELFT3D – FLOW é um modelo de simulação multidimensional que calcula escoamentos e transportes não estacionários, forçados por descargas fluviais, marés e processos meteorológicos em regiões costeiras, estuarinas, lagunas, rios, represas e lagos. Emprega uma grade horizontal curvilínea, facilmente ajustada aos contornos sólidos da região modelada, facilitando a representação de margens de rios, por exemplo. Suporta, como coordenadas verticais, a transformação conhecida na literatura por sigma ( $\sigma$ ) introduzida por Phillips (1957), resultando numa representação suave da topografia de fundo.

Os fluxos calculados pelo DELFT3D-FLOW podem ser forçados por marés, gradientes de densidade, tensão de cisalhamento do vento e gradientes de pressão atmosférica. Fontes e sorvedouros são incluídos na equação do movimento, simulando algum tipo de descarga como, por exemplo, rios.

O modelo DELFT3D-FLOW resolve as equações hidrodinâmicas aproximadas para águas rasas. Essa aproximação sugere que a profundidade é assumida muito menor que a escala horizontal do movimento. Pela razão de aspecto ser pequena, a aproximação de águas rasas é válida, e a equação do movimento em sua componente vertical é resumida ao equilíbrio hidrostático. Com isto, é assumido que a aceleração vertical é muito pequena comparada com a gravidade reduzida e esta é desprezada nas equações. Além disso, o DELFT3D-FLOW apresenta as seguintes características:

- Na camada de fundo, o efeito do atrito é parametrizado em ordem quadrática;
- A formulação que assume a tensão de cisalhamento provocada pelo fundo em combinação com as correntes é baseada num campo bidimensional de fluxos, gerada a partir de velocidades próximas ao fundo usando uma aproximação logarítmica;
- Os pontos de grade podem ser assumidos como sendo secos quando a profundidade é menor que o descrito para a batimetria. Neste caso, a velocidade neste ponto de grade é considerada como sendo zero. Em instantes de tempo posteriores esta célula pode voltar a ser considerado ponto de grade úmido, de acordo com o nível em relação à batimetria.

As principais equações utilizadas pelo DELFT3D-FLOW são apresentadas no ANEXO A.

### III.2.1 Grade numérica

A correta confecção da grade numérica para o modelo numérico hidrodinâmico é detalhe fundamental para atingir os objetivos propostos.

Os principais detalhes que devem ser atentados para uma grade numérica são:

- Abrangência espacial: deve ser suficiente para que todos os fenômenos que atuam significativamente sobre os movimentos da região sejam representados;
- Linhas de costa e batimetria: é necessária a perfeita identificação da região costeira, bem como a disponibilidade de batimetria com resolução acordante com a da grade numérica proposta;
- Resolução espacial: indica o tamanho dos elementos de grade e deve considerar a relação: escala dos movimentos Vs. tempo computacional. Quanto maior a resolução, maior será o detalhamento dos fenômenos, contudo, maior tempo computacional é requerido. A resolução espacial deve atender a resolução dos fenômenos que atuem significativamente sobre a região;
- Ortogonalidade: indica a perpendicularidade da grade ao longo da direção horizontal (direções x e y), definida como o cosseno do ângulo fechado. Para a eficiência computacional, a ortogonalidade da grade deve ser suficientemente alta (valores próximos à zero).

A linha de costa foi obtida por meio de imagens de satélite provenientes de MapLink/TeleAtlas®, Digital Globe®, Geo Eye®, Data Sio®, NGA® e GEBCO® distribuídas pelo Google Earth® Pro.

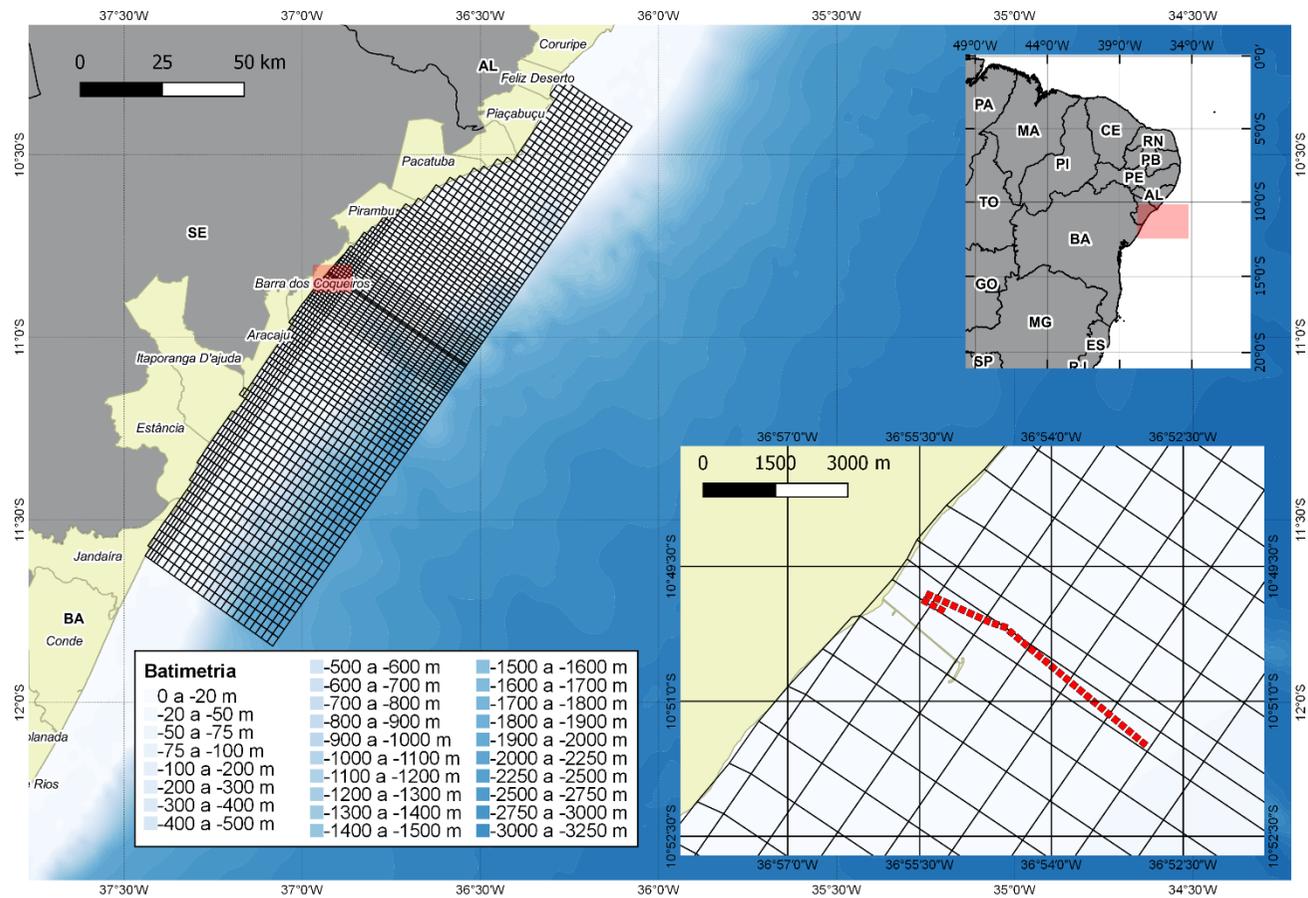
Para a batimetria, foram digitalizadas cartas náuticas provenientes da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil. As cartas náuticas utilizadas, bem como sua data de atualização, estão listadas na **Tabela III.2-1**.

**Tabela III.2-1** - Cartas náuticas da DHN utilizadas para obtenção da batimetria da área de estudo.

Carta Náutica	Data de atualização
1000 - DE MACEIÓ AO RIO ITARIRI	25/11/2016
1001 - PORTO DE BARRA DOS COQUEIROS	25/11/2016

Juntamente com as cartas náuticas, foram utilizados os dados batimétricos do levantamento de detalhe realizado na região de estudo. A batimetria utilizada nas simulações foram a combinação das cartas náuticas com o levantamento de detalhe da região.

A grade numérica confeccionada para este estudo é curvilínea com resolução variável, desde 3.000 m até 200 m na região do gasoduto e emissário. Sua representação gráfica aparece na **Figura 10**.



**Figura 10** - Grade numérica desenvolvida para as simulações hidrodinâmicas. No painel menor a linha tracejada vermelha mostra a localização do gasoduto e do emissário.

A dimensão vertical adotada foi de 10 camadas sigma, com resolução variável. As camadas, com relação à porcentagem da profundidade da coluna de água, foram de: 5%, 7%, 9%, 13%, 16%, 16%, 13%, 9%, 7%, 5%.

De forma resumida, as propriedades de forma das Grades Externa e Interna estão listadas na **Tabela III.2-2**.

**Tabela III.2-2** - Propriedades de forma da grade numérica confeccionada para as simulações hidrodinâmicas.

Propriedade	
Pontos	104 x 29
Resolução horizontal mínima	3.000 m
Resolução horizontal máxima	200 m
Resolução vertical	10 camadas

### III.2.2 Condições iniciais

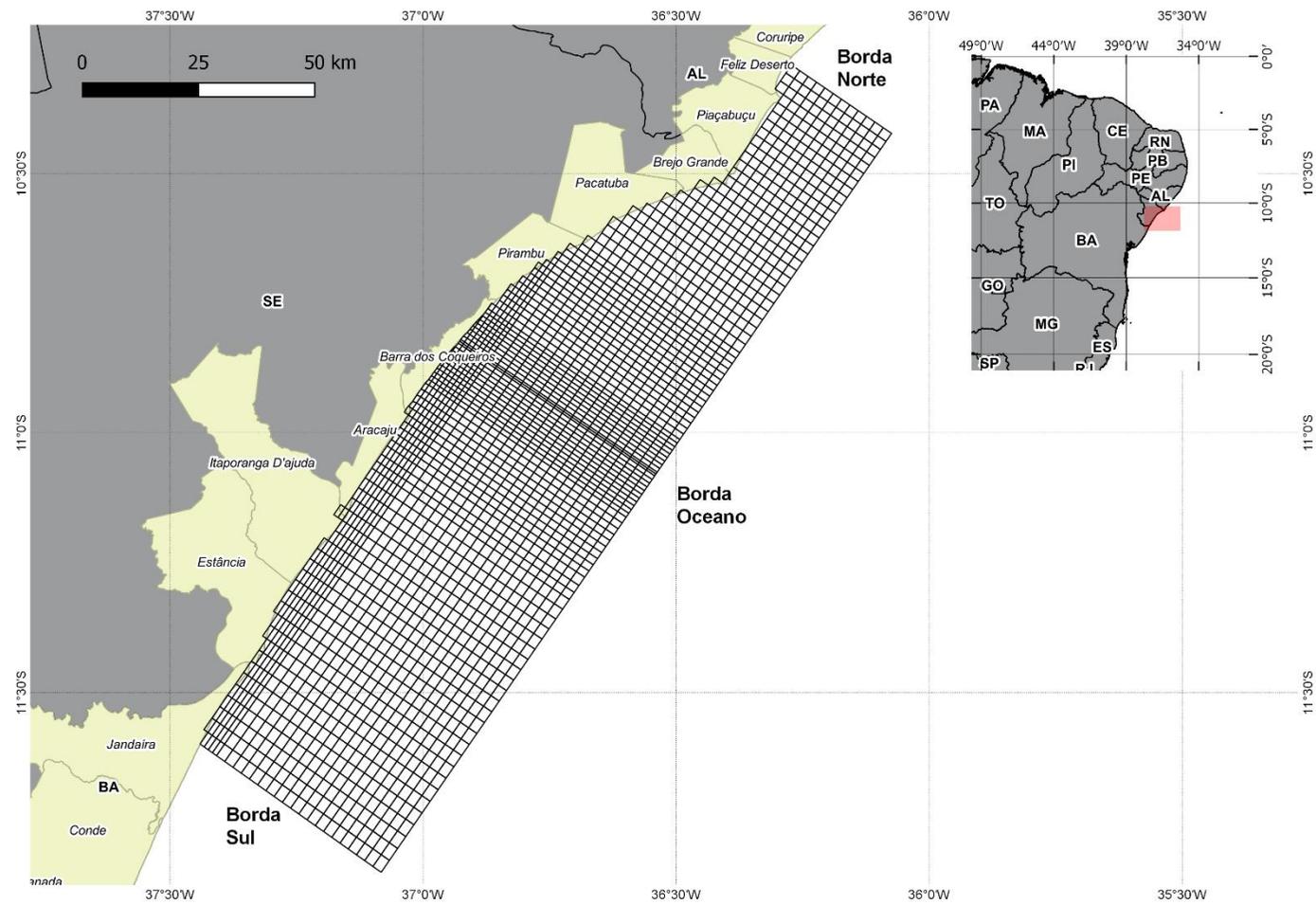
Para as condições iniciais de temperatura e salinidade foram utilizados os valores descritos na **Seção II.2**, onde uma compilação de autores mostra uma estratificação da coluna de água na região. Para ambas as simulações foram consideradas condições homogêneas do oceano, com salinidade 33 e temperatura de 27 °C.

As condições iniciais de velocidade e elevação da superfície livre foram nulas em todos os pontos de grade. Desta maneira, os instantes iniciais da modelagem em que o modelo se adaptou às condições de bordas impostas, comumente conhecida como período de aquecimento do modelo, foram descartados após análise destes campos. Para este estudo, o período inicial descartado das simulações foi de 2 dias.

### III.2.3 Condições de borda

As bordas fechadas foram utilizadas de maneira a se representar a linha de costa, de forma impermeável, com velocidades perpendiculares nulas. Já as bordas abertas impostas às grades do modelo hidrodinâmico estão representadas na **Figura 11**.

Para as bordas abertas, foram impostas elevações do nível do mar de acordo com as componentes de maré astronômicas mais significativas. As componentes de maré foram obtidas a partir do modelo global TPXO 7.2 (EGBERT & EROFEEVA, 2002) para os harmônicos M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, MF, MM, M4, MS4 e MN4. Em cada um dos vértices apresentados na **Figura 11** foram impostos valores de amplitude e fase das componentes em questão (**Tabela III.2-3**), sendo que os valores impostos nos pontos intermediários representam resultado da interpolação linear entre os vértices.



**Figura 11** - Configuração das bordas abertas da grade numérica utilizadas nas simulações hidrodinâmicas.

**Tabela III.2-3 - Amplitude e fase das constantes harmônicas impostas nas bordas abertas da Grade Externa. A fase é relativa a Greenwich.**

	Sul		Oceano		Norte	
	Amplitude (m)	Fase (°)	Amplitude (m)	Fase (°)	Amplitude (m)	Fase (°)
M2	0,690	190,33	0,695	191,05	0,700	192,05
S2	0,260	207,2	0,260	208,05	0,260	209,23
N2	0,130	183,24	0,131	183,64	0,133	184,15
K2	0,076	203,11	0,075	204,04	0,075	205,25
K1	0,039	255,31	0,038	257,52	0,038	260,03
O1	0,060	161,98	0,059	162,95	0,058	164,71
P1	0,011	247,24	0,011	249,86	0,011	252,7
Q1	0,017	133,39	0,017	134,23	0,017	135,66
MF	0,015	357	0,015	357,16	0,015	357,45
MM	0,007	355,38	0,007	355,36	0,008	355,31

Fonte: TPXO 7.2.

Para as propriedades temperatura e salinidade, foram impostos valores nas bordas abertas referentes às condições iniciais apresentadas, de modo a não introduzir campo de massa diferente daquele estipulado no início das simulações.

Para a condição de borda atmosférica foi imposta o vento coletado na cidade de Aracajú. Maiores detalhes desta fonte de dados estão disponíveis no item **III.6 Cenário de Modelagem**.

### III.2.3.1 Calibração e validação do modelo hidrodinâmico

A calibração do modelo hidrodinâmico foi realizada por meio de estudos de sensibilidade dos coeficientes, verticais e horizontais, de viscosidade e difusividade. Estes valores foram variados, dentro de níveis reais, e os resultados obtidos de nível do mar, velocidades e estratificação da coluna de água foram comparados com valores de referência (bibliográficos).

O modelo de fechamento turbulento utilizado nas simulações numéricas foi o k- $\epsilon$ , cujo detalhamento matemático e numérico encontra-se no Apêndice A. Este modelo de fechamento turbulento utiliza o número de Schmidt ( $\sigma_c$ ) igual a:

$$\sigma_c = \frac{V_H}{D_H} = 0,7 \quad (1)$$

Onde:

$V_H$  é o coeficiente de viscosidade horizontal

$D_H$  é o coeficiente de difusividade horizontal

Os coeficientes de viscosidade e difusividade não são calculados pelo modelo de fechamento turbulento, mas sim especificados pelo usuário. Desta maneira, os valores dos coeficientes horizontais de difusividade e viscosidade seguiram o preceito da Equação 1. De acordo com o manual do modelo DELFT3D-FLOW (DELTARES, 2011), para grades com resolução espacial horizontal da ordem de 10 m ou menos, os valores sugeridos, para ambos os coeficientes, estão no intervalo entre 1 e 10 m<sup>2</sup>.s-1. Após diversos testes de calibração, foram utilizados os coeficientes de viscosidade e difusividade iguais a 70 m<sup>2</sup>.s-1 e 100 m<sup>2</sup>.s-1, respectivamente.

O coeficiente de difusividade vertical (DV) é derivado da viscosidade turbulenta. Mesmo que os valores verticais sejam determinados pelo modelo de fechamento turbulento, o valor de background tem que ser especificado para amortecer as oscilações geradas por condições de fronteira, ventos, etc. (DELTARES, 2011). Ainda, seguindo as mesmas sugestões do manual, os coeficientes verticais para a viscosidade (VV) e difusividade são de  $10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  e  $1,43 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , respectivamente. Estes valores se mostraram adequados dentro dos experimentos realizados.

Com o objetivo de avaliar o desempenho do modelo hidrodinâmico, foram realizadas comparações entre os níveis do mar computados pelo modelo e dados de previsão de maré para três locais na região, cujas constantes harmônicas são disponibilizadas pela Fundação de Estudos do Mar – Femar (2002). Foram selecionados os locais: Terminal Portuário de Sergipe, Cabeço e Plataforma PCM1, conforme apresentadas nas **Figura 12** a **Figura 14**.

<b>Nome da Estação :</b>		<b>TERMINAL PORTUÁRIO DE SERGIPE - SE</b>			
<b>Localização :</b>		Barra dos Coqueiros			
<b>Organ. Responsável :</b>		DHN / CVRD			
<b>Latitude :</b>		10° 50,0' S	<b>Longitude :</b>		36° 55,7' W
<b>Período Analisado :</b>		18/02/91 a 19/03/91	<b>Nº de Componentes :</b>		17
<b>Análise Harmônica :</b>		Método Almirante Santos Franco			
<b>Classificação :</b>		Maré Semidiurna.			
<b>Estabelecimento do Porto: (HWF&amp;C)</b>		III H 51 min	<b>Nível Médio (Zo):</b>		124 cm acima do NR.
<b>Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :</b>		225 cm acima do NR.	<b>Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :</b>		170 cm acima do NR.
<b>Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :</b>		22 cm acima do NR.	<b>Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :</b>		77 cm acima do NR.
<b>CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS</b>					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU <sub>2</sub>	-	-
Ssa	-	-	N <sub>2</sub>	14,6	097
Mm	3,3	200	NU <sub>2</sub>	2,8	098
Mf	-	-	M <sub>2</sub>	74,0	107
MTM	-	-	L <sub>2</sub>	2,4	144
Msf	3,1	344	T <sub>2</sub>	1,6	122
Q <sub>1</sub>	2,1	088	S <sub>2</sub>	27,4	122
O <sub>1</sub>	6,4	120	K <sub>2</sub>	7,4	123
M <sub>1</sub>	-	-	MO <sub>3</sub>	-	-
P <sub>1</sub>	1,1	224	M <sub>3</sub>	-	-
K <sub>1</sub>	3,2	233	MK <sub>3</sub>	-	-
J <sub>1</sub>	-	-	MN <sub>4</sub>	-	-
OO <sub>1</sub>	-	-	M <sub>4</sub>	1,1	160
MNS <sub>2</sub>	-	-	SN <sub>4</sub>	-	-
2N <sub>2</sub>	1,9	086	MS <sub>4</sub>	-	-
<b>Referências de Nível:</b> RN marco de concreto junto à balança rodoviária, no início da ponte de acesso ao cais. RN 1,2 e 3 d DHN localizadas próximo ao marégrafo, no cais da Sereia					
<b>Obs:</b> Outros Períodos: 01/02/91 a 14/02/91; 19/06/91 a 20/07/91 e 29/07/95 a 17/09/95. Consta das Tábuas das Marés					

Código BNDO: 30810

Figura 12 – Constantes harmônicas para o terminal portuário de Sergipe.

Fonte: FEMAR (2002).

<b>Nome da Estação :</b> CABEÇO – SE					
<b>Localização :</b> Na Barra do Rio São Francisco, em frente ao Farol.					
<b>Organ. Responsável :</b> INPH / DHN					
<b>Latitude :</b> 10° 30,2' S	<b>Longitude :</b> 36° 24,0' W				
<b>Período Analisado :</b> 06/04/81 a 12/05/81	<b>Nº de Componentes :</b> 82				
<b>Análise Harmônica :</b> Método Almirante Santos Franco.					
<b>Classificação :</b> Maré Semidiurna.					
<b>Estabelecimento do Porto:</b> (HWF&C)	IV H 21 min	<b>Nível Médio</b> (Zo):	99 cm acima do NR.		
<b>Médias das Preamares de Sízigia (MHWS) :</b>	176 cm acima do NR.	<b>Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :</b>	134 cm acima do NR.		
<b>Média das Baixa-mares de Sízigia (MLWS) :</b>	22 cm acima do NR.	<b>Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :</b>	63 cm acima do NR.		
<b>CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS</b>					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU <sub>2</sub>	10,1	049
Ssa	-	-	N <sub>2</sub>	16,8	074
Mm	3,7	196	NU <sub>2</sub>	3,2	077
Mf	-	-	M <sub>2</sub>	56,2	102
MTM	3,2	050	L <sub>2</sub>	7,6	123
Msf	1,4	169	T <sub>2</sub>	1,2	127
Q <sub>1</sub>	1,3	021	S <sub>2</sub>	20,5	129
O <sub>1</sub>	9,4	125	K <sub>2</sub>	5,6	131
M <sub>1</sub>	2,1	200	MO <sub>3</sub>	3,3	140
P <sub>1</sub>	1,0	221	M <sub>3</sub>	1,6	264
K <sub>1</sub>	3,2	229	MK <sub>3</sub>	2,4	265
J <sub>1</sub>	1,8	074	MN <sub>4</sub>	1,8	115
OO <sub>1</sub>	2,4	320	M <sub>4</sub>	2,3	148
MNS <sub>2</sub>	1,9	113	SN <sub>4</sub>	1,0	051
2N <sub>2</sub>	2,2	045	MS <sub>4</sub>	1,5	158
<b>Referências de Nível:</b> NR localizada no 9º degrau de baixo para cima da escada do farol São Francisco do Norte.					
<b>Obs:</b> Não há referências a outros períodos.					

Código BNDO: 30800

Figura 13 – Constantes harmônicas para Cabeço/SE.

Fonte: FEMAR (2002).

<b>Nome da Estação :</b>		<b>PLATAFORMA PCM - 1 (OCEÂNICA)</b>			
<b>Localização :</b>		Próximo a Aracaju - SE			
<b>Organ. Responsável :</b>		INPH / DHN			
<b>Latitude :</b>		11° 00,0' S	<b>Longitude :</b> 36° 59,6' W		
<b>Período Analisado :</b>		15/11/80 a 16/12/80	<b>Nº de Componentes :</b> 72		
<b>Análise Harmônica :</b>		Método Almirante Santos Franco			
<b>Classificação :</b>		Maré Semidiurna.			
<b>Estabelecimento do Porto: (HWF&amp;C)</b>		III H 42 min	<b>Nível Médio (Zo):</b>		124 cm acima do NR.
<b>Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :</b>		221 cm acima do NR.	<b>Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :</b>		160 cm acima do NR
<b>Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :</b>		26 cm acima do NR.	<b>Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :</b>		88 cm acima do NR.
<b>CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS</b>					
Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU2	0,4	125
Ssa	-	-	N2	17,5	064
Mm	3,8	014	NU2	3,3	068
Mf	-	-	M2	66,8	090
MTM	0,4	274	L2	3,6	195
Msf	6,4	215	T2	1,8	098
Q1	2,7	110	S2	30,9	098
O1	5,7	124	K2	8,4	099
M1	0,3	147	MO3	1,2	136
P1	1,4	197	M3	0,8	056
K1	4,1	203	MK3	0,5	129
J1	2,2	010	MN4	0,4	152
OO1	1,4	341	M4	0,9	120
MNS2	4,2	337	SN4	0,3	203
2N2	2,3	038	MS4	1,0	266
<b>Referências de Nível:</b> Não foram instaladas RNs.					
<b>Obs:</b> Plataforma da Petrobras - Campo marítimo de Aracaju (não está mais em posição).					

Código BNDO: 30823

Figura 14 – Constantes harmônicas para a Plataforma PCM-1.

Fonte: FEMAR (2002).

Para avaliar a similaridade entre os dados previstos e os modelados foram utilizados o Coeficiente de Ajuste (NRMS) e o Skill (S).

O NRMS pode ser utilizado para qualquer série escalar (nível do mar e componentes de velocidade, por exemplo) e é baseado em Hess & Bosley (1992), cuja formulação é frequentemente utilizada na literatura científica para a comparação de duas séries com periodicidades relativamente definidas. O coeficiente é definido pela normalização do erro quadrático médio (Equações 3 e 4) e o resultado aparece em percentagem (quanto maior a percentagem, maior o erro).

$$NRMS = \frac{RMS}{d_{mod (max)} - d_{mod (min)}} \quad (3)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_{med} - d_{mod})^2}{n}} \quad (4)$$

Onde:

$d_{med}$  representa o dado medido

$d_{mod}$  representa o dado simulado

$A_{mod (max)}$  é o valor máximo do dado medido

$A_{mod (min)}$  é o valor mínimo do dado medido

$n$  representa o número de medições

O S é um método estatístico desenvolvido por Wilmott (1981) e descrito por Warner *et al.* (2005) e Li *et al.* (2005), que é expressa pela Equação 5. Este método estabelece comparação entre os dados medidos e os simulados (modelados), apresentando coeficientes finais que variam entre 0 e 1 (onde valores próximos de 1 representam um ajuste perfeito e 0 total discordância).

$$S = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |d_{mod} - d_{med}|^2}{\sum_{i=1}^n (|d_{mod} - \bar{d}_{med}| + |d_{med} - \bar{d}_{med}|)^2} \quad (5)$$

Onde:

$d_{med}$  representa o dado medido

$d_{mod}$  representa o dado simulado

$n$  representa o número de medições

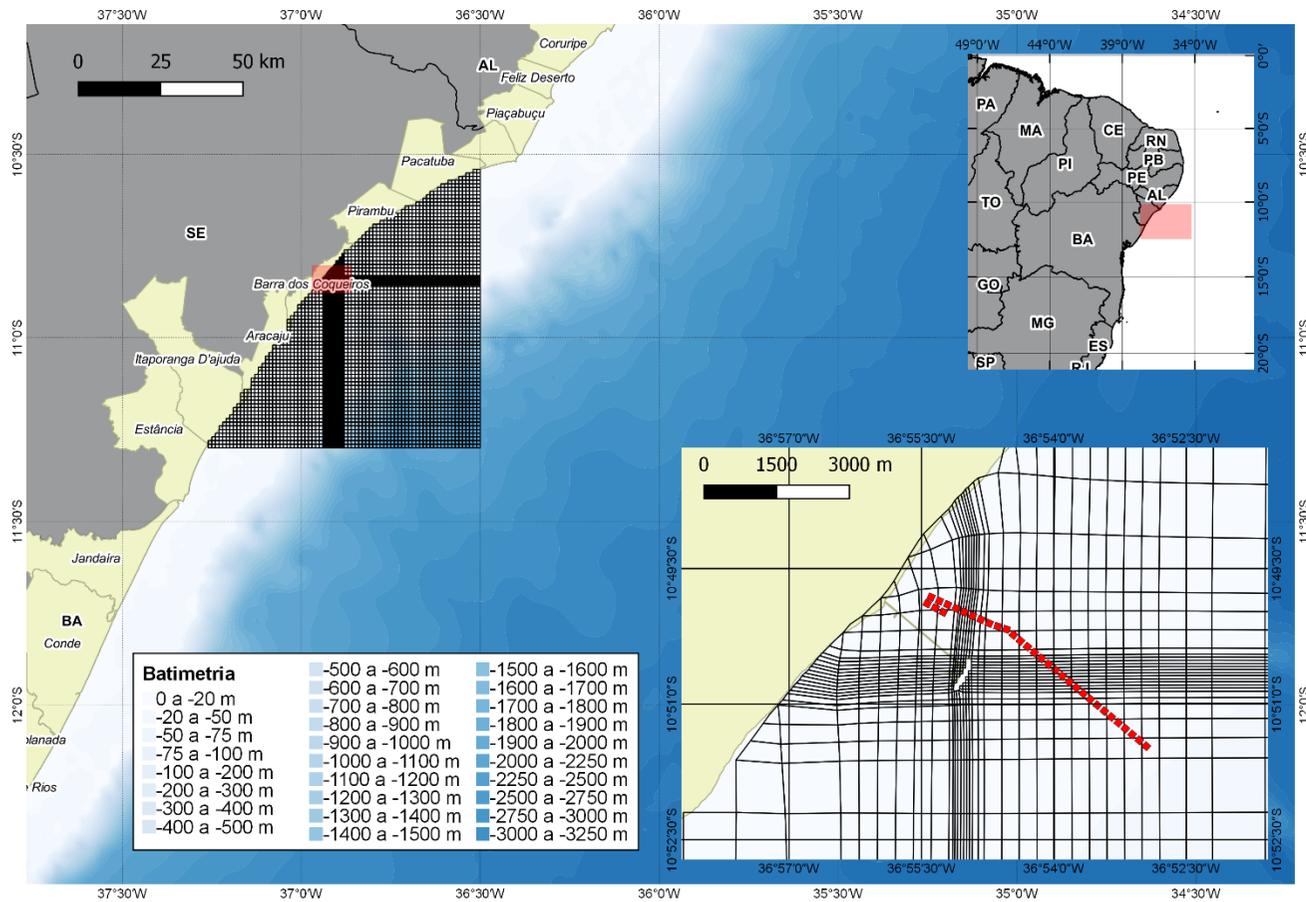
### **III.3            MODELAGEM DE ONDAS**

Para a modelagem regional de ondas foi utilizado o modelo numérico DELFT-WAVE. Este modelo de onda reproduz o deslocamento de ondas em águas rasas, geração de onda a partir do vento; interações não lineares entre onda-onda e dissipação de energia para uma determinada topografia de fundo, campo de vento, nível de água e campo de correntes. Neste módulo é implementado o modelo de terceira geração SWAN (Simulating Waves Nearshore) que leva em consideração a evolução de ondas aleatórias de curto comprimento de onda em regiões costeiras de águas rasas, intermediárias e profundas, considerando a refração devido a correntes e variação de batimetria, reproduzindo também processos de difração. A descrição matemática dos processos envolvidos é apresentada no Anexo B.

#### **III.3.1        Grade numérica**

A obtenção da linha de costa e batimetria foram as mesmas já descritas para o módulo hidrodinâmico.

A grade numérica confeccionada para a obtenção do regime de ondas é curvilínea com resolução variável, desde 1.100 m até 40 m na região do gasoduto e emissário. Sua representação gráfica aparece na **Figura 15**.



**Figura 15** – Grade numérica desenvolvida para as simulações de ondas em contexto regional. No painel menor a linha tracejada vermelha mostra a localização do gasoduto e do emissário.

De forma resumida, as propriedades de forma da grade das simulações de ondas estão listadas na **Tabela 4**.

**Tabela 4-** *Propriedades de forma da grade numérica confeccionada para as simulações de ondas.*

Propriedade	
Pontos	97x95
Resolução horizontal mínima	1.1000 m
Resolução horizontal máxima	40 m

### **III.3.2 Condições de borda**

As bordas fechadas foram utilizadas de maneira a se representar a linha de costa, de forma impermeável, com velocidades perpendiculares nulas. Já as bordas abertas impostas a grade do modelo de ondas estão representadas na **Figura 16**. Nestas bordas abertas, foram impostas alturas, períodos e direções de ondas do modelo Wave Watch II do NCEP, no ponto descrito no item II.3 deste documento.

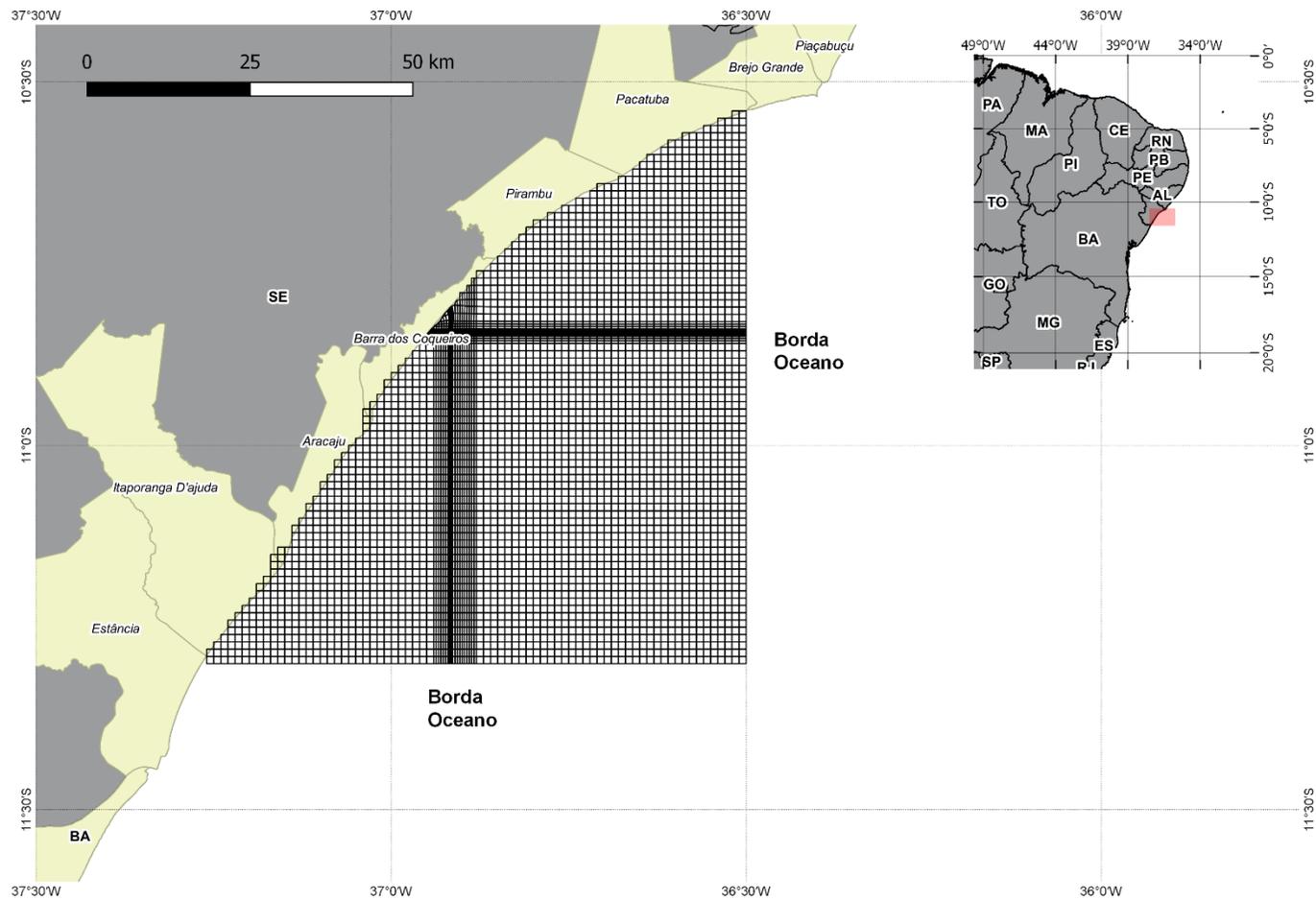


Figura 16 – Bordas abertas empregadas na grade numérica desenvolvida para as simulações de ondas em contexto regional.

Para a condição de borda atmosférica foi imposta o vento coletado na cidade de Aracajú descritos no item II.2 deste documento.

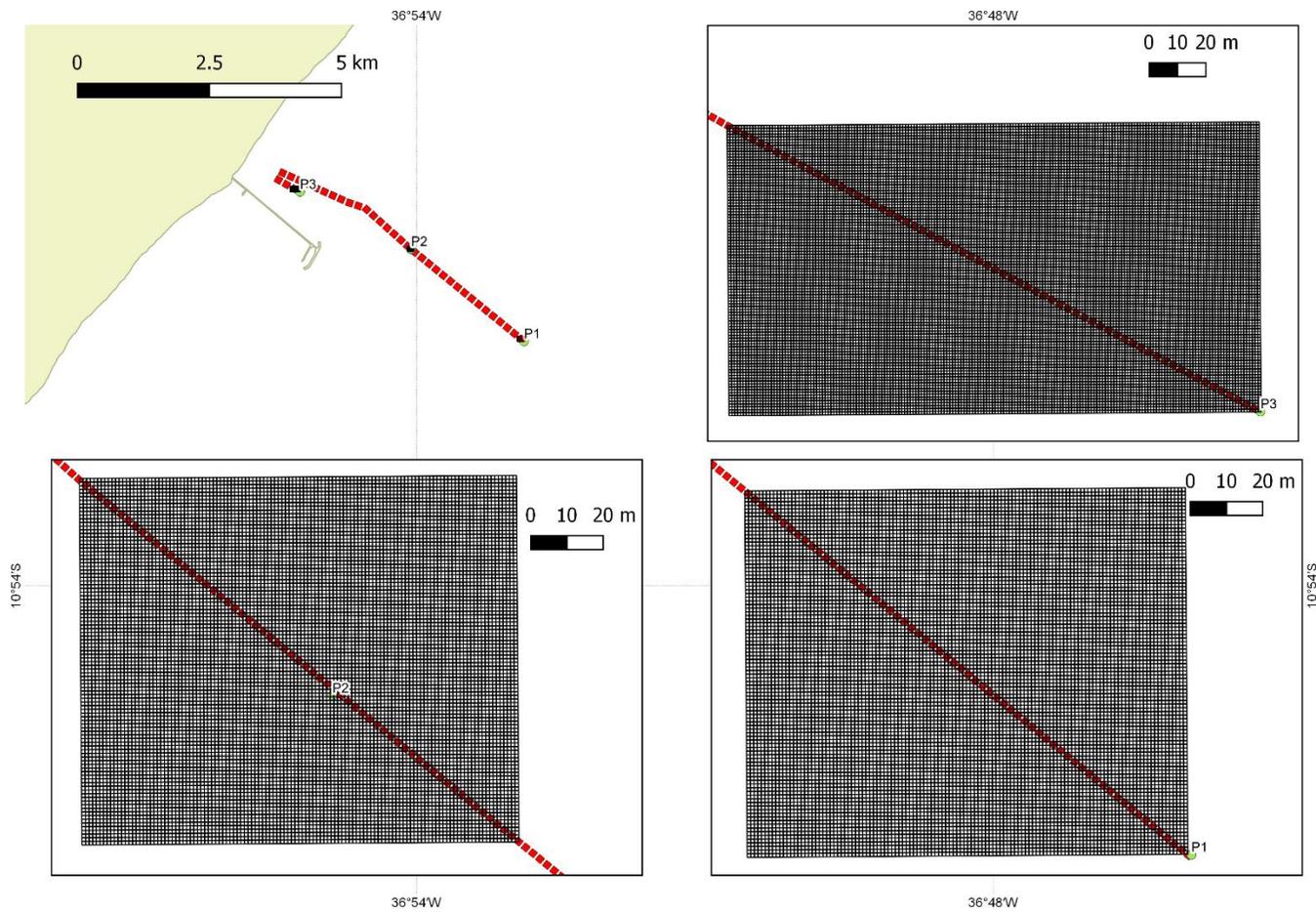
Maiores detalhes sobre o período de dados utilizados nas simulações estão apresentados no item **III.5 Cenário de Modelagem**.

### **III.4 MODELAGEM MORFOLÓGICA**

Para este estudo foi utilizado o módulo morfológico DELFT3D-MOR, 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 as ondas, correntes, transporte de sedimento e batimetria. A conexão entre os módulos envolvidos no processo (waves-flow-transport-bottom) ocorre via acoplamento dinâmico. As equações principais que descrevem este modelo estão disponíveis no Apêndice C.

#### **III.4.1 Grade numérica**

Para o estudo morfodinâmico foram elaboradas três grades numéricas, regulares, de 1 m de resolução, em três trechos específicos do gasoduto, conforme apresentado na **Figura 17**. Assim como o que foi realizado com o modelo hidrodinâmico, o modelo morfodinâmico sofreu também um tempo de aquecimento para sua estabilização. O período selecionado para as três grades foi de 1 semana.



**Figura 17** – Grades numéricas desenvolvidas para as simulações de variações morfodinâmicas. As linhas tracejadas vermelhas mostram a localização do gasoduto e do emissário.

De forma resumida, as propriedades de forma das grades utilizadas nas simulações de variação morfodinâmicas estão listadas na **Tabela 5**.

**Tabela 5-** Propriedades de forma da grade numérica confeccionada para as simulações hidrodinâmicas.

Propriedade	P1	P2	P3
Pontos	123 x 121	122 x 101	189 x 102
Resolução horizontal	01 m		
Resolução na vertical	10 camadas sigma		

#### III.4.2 Condições de borda

Nas grades utilizadas para simular as variações morfodinâmicas as quatro bordas laterais foram impostas como sendo abertas. Nestas foram inseridos os resultados hidrodinâmicos e de ondas obtidos dos módulos hidrodinâmicos e de ondas descritos anteriormente.

Para a condição de borda atmosférica foi imposto o vento coletado na cidade de Aracajú descritos no item II.2 deste documento.

Maiores detalhes sobre o período de dados utilizados nas simulações estão apresentados no item **III.5 Cenário de Modelagem**.

#### III.4.3 Composição do fundo marinho

Em cada uma das grades numéricas desenvolvidas foram aplicadas profundidades homogêneas, sendo de 20, 13 e 6 m, respectivamente para as grades dos pontos P1, P2 e P3. No local de passagem do gasoduto, foi aplicada batimetria com 1 m, inferior, ou seja, nas grades P1 o local onde passará o gasoduto foi aplicada batimetria de 19 m, no P2, 12 m e no P3, 5 m.

Com exceção do local onde ocorrerá a passagem do gasoduto e emissário, o fundo marinho foi configurado com as características sedimentológica descritas na **Tabela 6**. Estas propriedades sedimentológicas foram obtidas em coletas de campo em 16/05/2017.

**Tabela 6-** Propriedades sedimentológicas aplicadas para as grades para simulação das variações morfodinâmicas.

Sedimentologia	Diâmetro (mm)	Grades numéricas		
		P1	P2	P3
Argila (%)	0,004	32,2	18,7	1,1
Silte (%)	0,032	67,4	70,3	12,3
Areia muito fina (%)	0,09	0,4	11	85,2
Areia fina (%)	0,18	<0,3	<0,3	1,4
Areia média (%)	0,37	<0,3	<0,3	<0,3
Areia grossa (%)	0,75	<0,3	<0,3	<0,3
Areia muito grossa (%)	1,5	<0,3	<0,3	<0,3

### **III.5 CENÁRIOS DE MODELAGEM**

A escolha dos cenários ambientais nos quais foram realizadas as modelagens tiveram como premissa identificar o pior cenário real possível, adotando premissas conservativas.

Conforme apresentado no item II.3, a análise de altura de ondas para a região de instalação do gasoduto e emissário apresentou maior altura média de onda para o ano de 2014, com altura significativa média de 1,88 m.

Assim, o modelo hidrodinâmico de ondas e de alterações morfológicas foram integrados ao longo do ano de 2014, com um ano completo de simulações.

## IV.RESULTADOS

### IV.1 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Da **Figura 18** a **Figura 29** são apresentados os resultados hidrodinâmicos e de ondas para os pontos P1, P2 e P3 – a localização destes pontos está apresentada na **Figura 17**. A **Tabela 7** apresenta as estatísticas básicas dos ventos para o ano de 2014 aplicado nas simulações, a **Tabela 8** as estatísticas básicas de variação do nível do mar nos pontos P1, P2 e P3 e a **Tabela 9** as estatísticas básicas da intensidade das correntes nos mesmos locais.

**Tabela 7** - Estatísticas básicas para a intensidade do vento para o ano de 2014 para os pontos P1, P2 e P3.

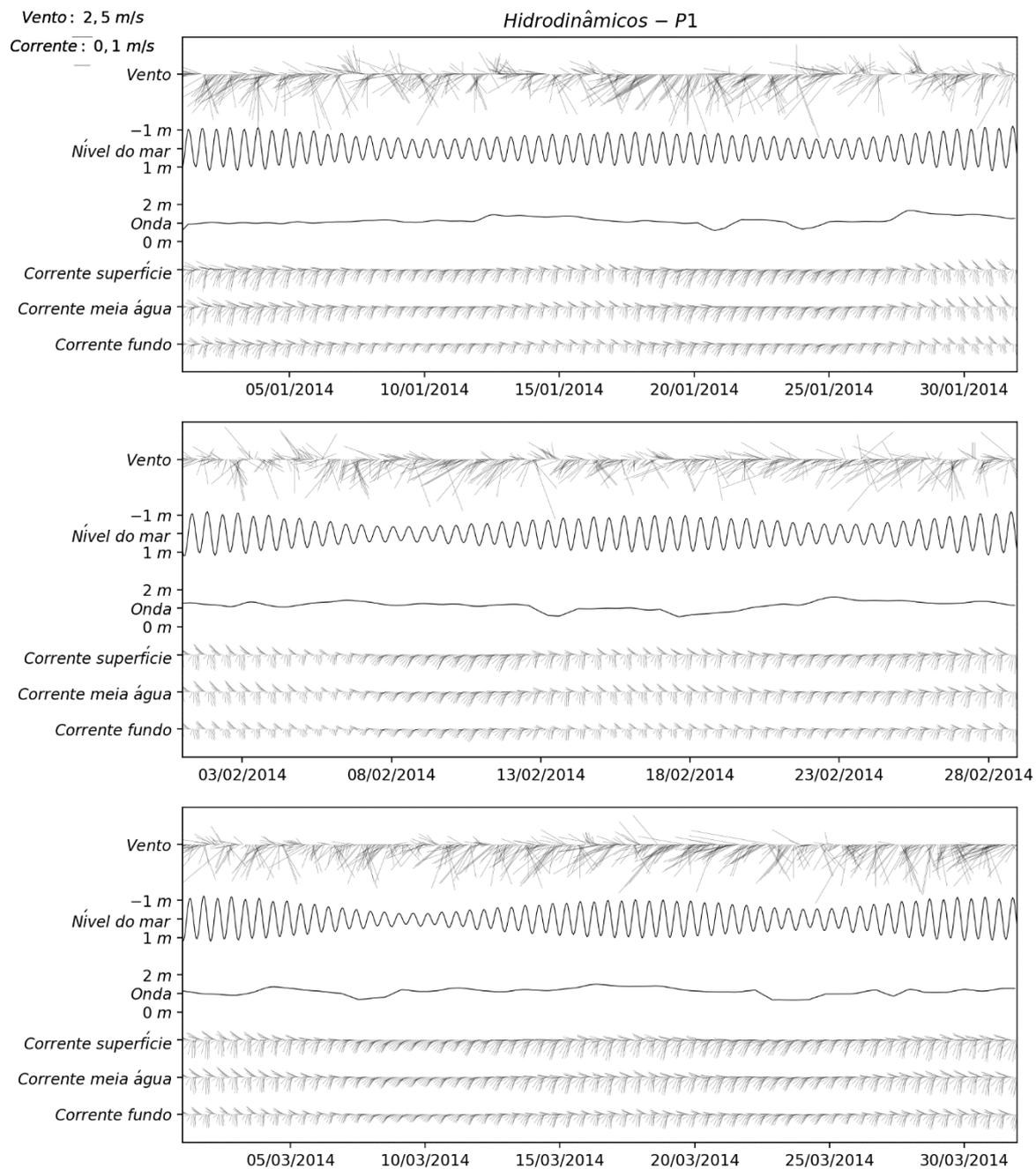
Período	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
Anual	3,04	0,00	12,33	1,58
Janeiro - Fevereiro - Março	2,80	0,00	10,28	1,54
Abril - Maio - Junho (Estação Chuvosa)	2,81	0,00	10,28	1,44
Julho - Agosto - Setembro	3,02	0,00	8,75	1,54
Outubro - Novembro - Dezembro (Estação Seca)	3,51	0,00	12,33	1,70

**Tabela 8** - Estatísticas básicas do nível do mar modelado para o ano de 2014 para os pontos P1, P2 e P3.

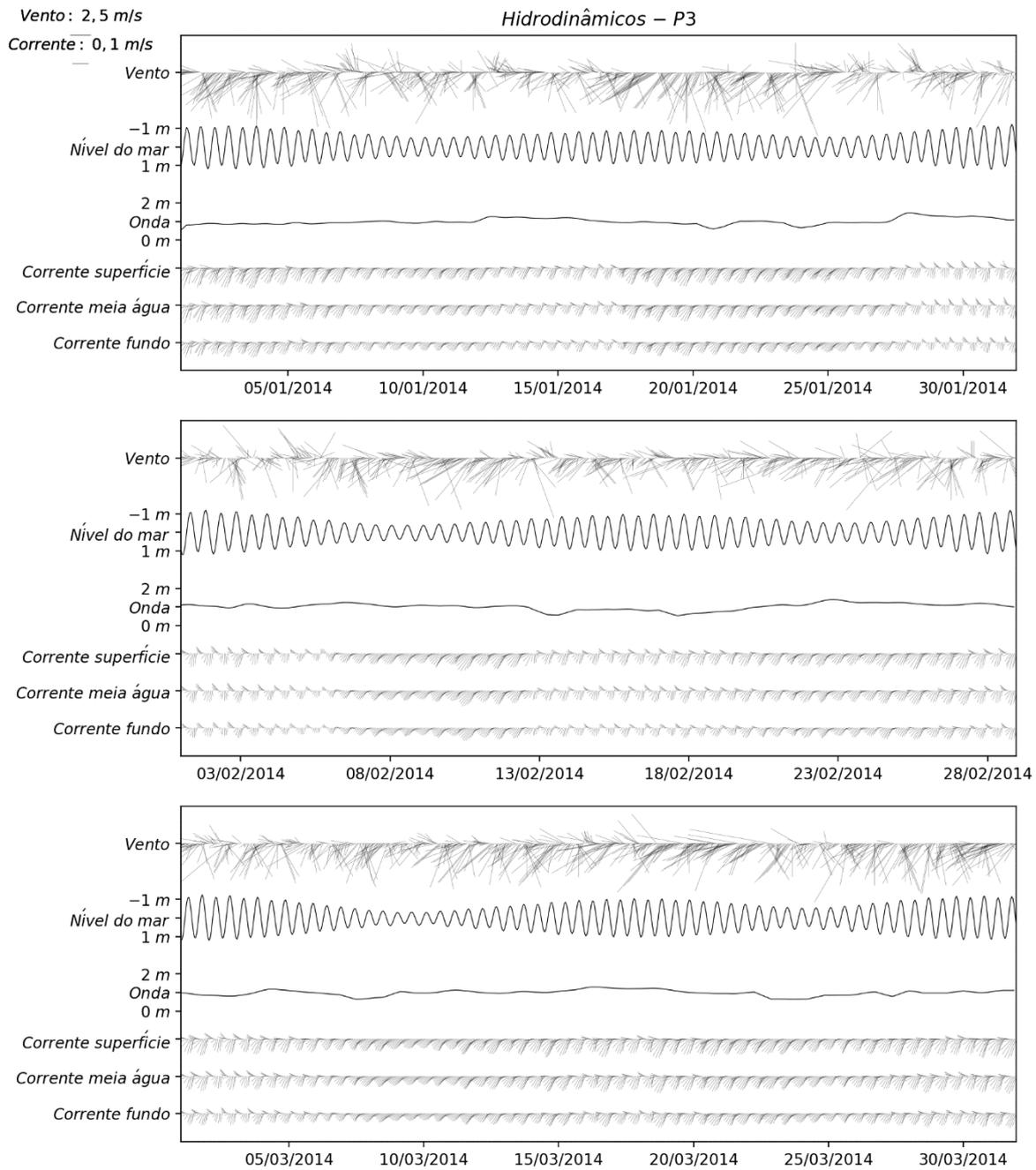
Período	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
Anual	0,00	-1,10	1,24	0,57
Janeiro - Fevereiro - Março	0,00	-1,21	1,24	0,58
Abril - Maio - Junho (Estação Chuvosa)	0,00	-1,10	1,08	0,56
Julho - Agosto - Setembro	0,00	-1,14	1,20	0,56
Outubro - Novembro - Dezembro (Estação Seca)	0,00	-1,14	1,20	0,56

**Tabela 9 - Estatísticas básicas para a intensidade das correntes modeladas para o ano de 2014 para os pontos P1, P2 e P3.**

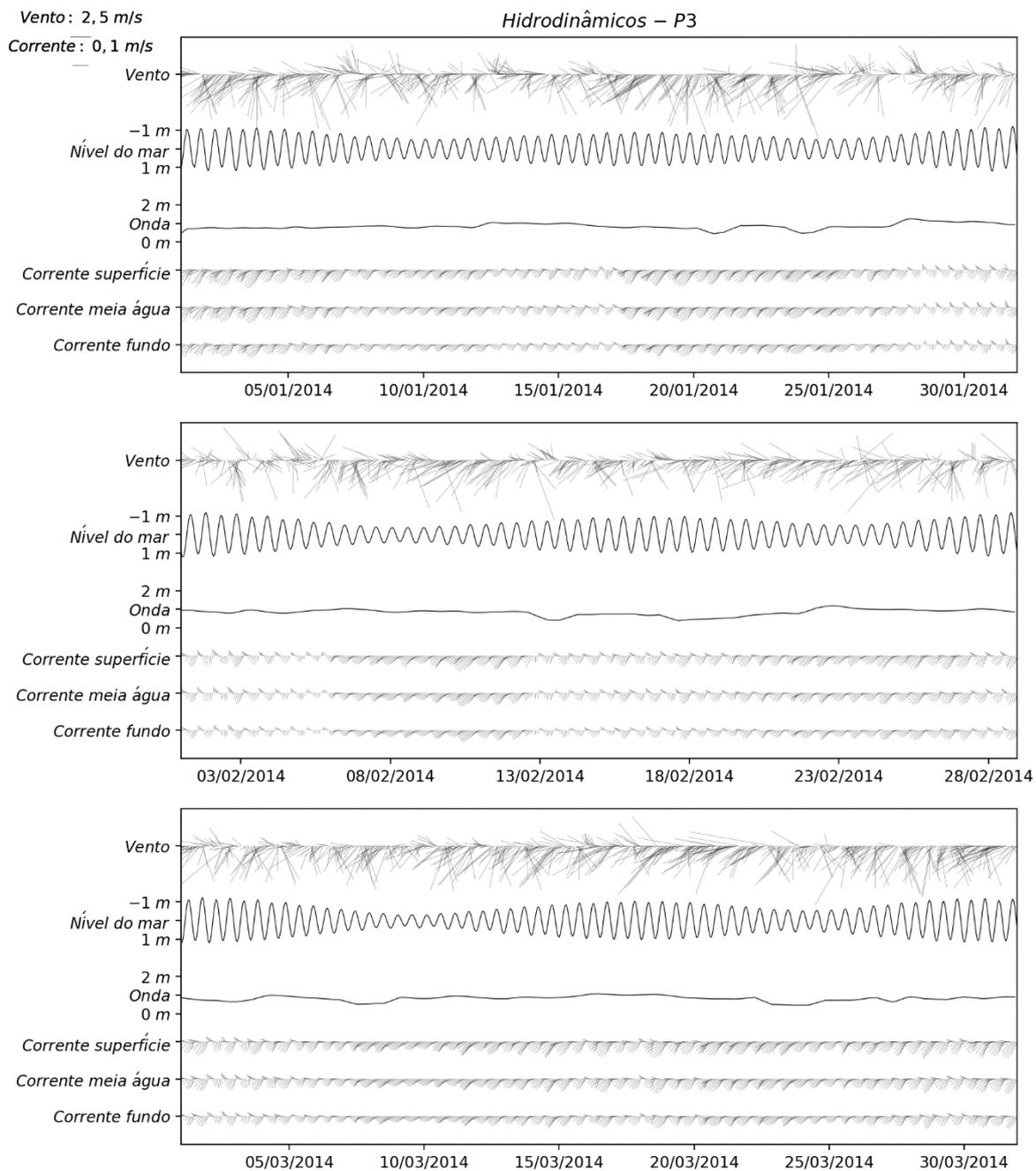
		P1				P2				P3			
		Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
Anual	Superfície	0,08	0,00	0,17	0,02	0,07	0,00	0,17	0,02	0,06	0,00	0,17	0,02
	Meia água	0,07	0,00	0,13	0,02	0,06	0,00	0,14	0,02	0,05	0,00	0,14	0,02
	Fundo	0,06	0,01	0,12	0,02	0,05	0,00	0,13	0,02	0,05	0,00	0,13	0,02
Janeiro – Fevereiro - Março	Superfície	0,08	0,01	0,14	0,02	0,06	0,00	0,14	0,02	0,06	0,00	0,13	0,02
	Meia água	0,07	0,01	0,12	0,02	0,06	0,00	0,12	0,02	0,05	0,00	0,12	0,02
	Fundo	0,06	0,01	0,12	0,02	0,05	0,00	0,12	0,02	0,05	0,00	0,11	0,02
Abril – Maio – Junho (estação chuvosa)	Superfície	0,07	0,02	0,15	0,02	0,06	0,01	0,17	0,02	0,05	0,00	0,17	0,02
	Meia água	0,06	0,01	0,13	0,02	0,05	0,00	0,14	0,02	0,05	0,00	0,14	0,02
	Fundo	0,06	0,01	0,12	0,02	0,05	0,00	0,13	0,02	0,04	0,00	0,13	0,02
Julho – Agosto - Setembro	Superfície	0,07	0,00	0,13	0,02	0,06	0,00	0,12	0,02	0,06	0,00	0,12	0,02
	Meia água	0,06	0,00	0,11	0,02	0,05	0,00	0,11	0,02	0,05	0,00	0,10	0,02
	Fundo	0,06	0,01	0,10	0,02	0,05	0,00	0,10	0,02	0,04	0,00	0,10	0,02
Outubro – Novembro – Dezembro (estação seca)	Superfície	0,09	0,03	0,17	0,02	0,08	0,03	0,16	0,02	0,07	0,02	0,15	0,02
	Meia água	0,08	0,03	0,13	0,01	0,07	0,02	0,14	0,02	0,06	0,01	0,13	0,02
	Fundo	0,07	0,03	0,12	0,02	0,06	0,01	0,13	0,02	0,06	0,01	0,12	0,02



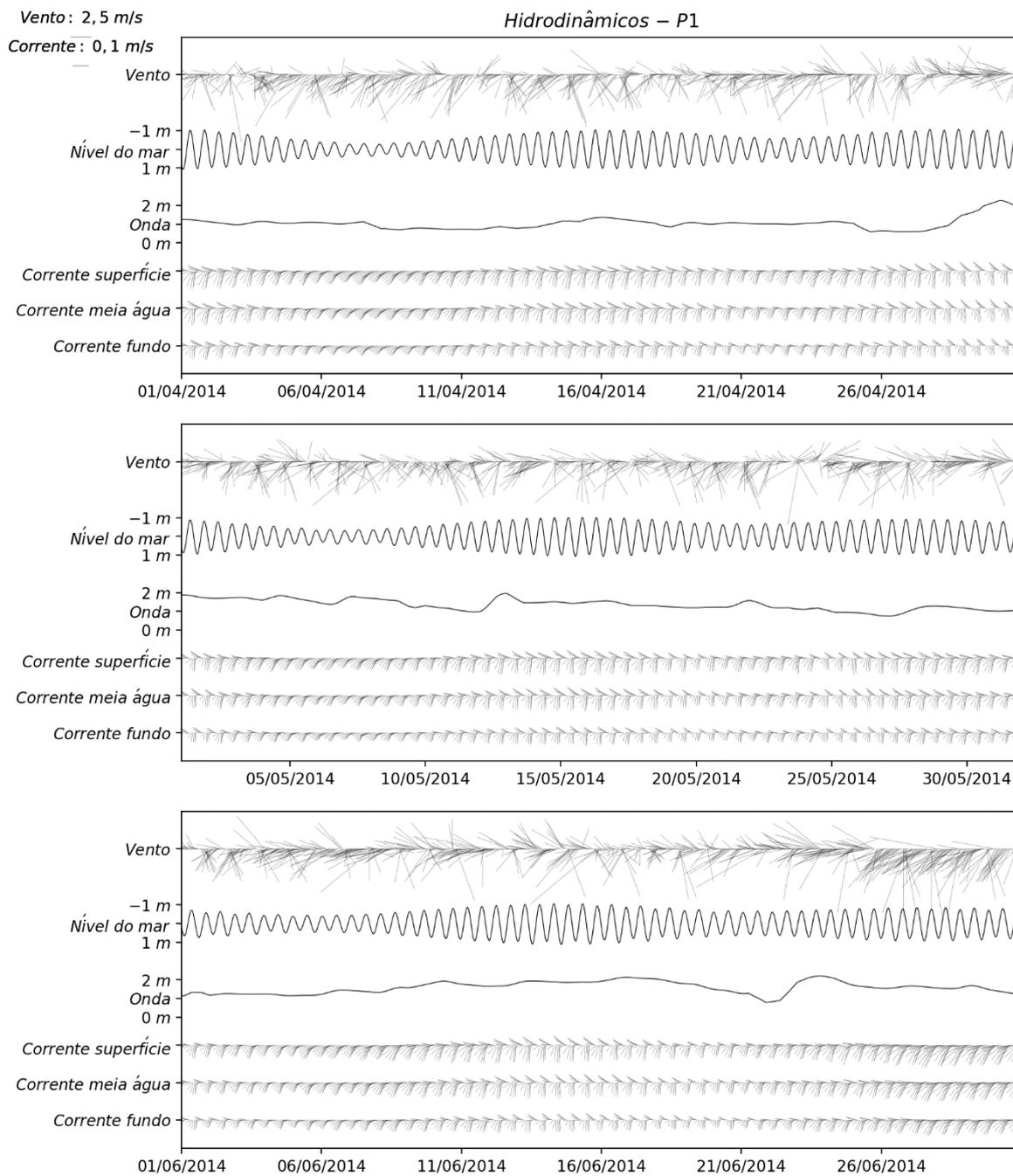
**Figura 18** – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P1 nos meses de janeiro (superior), fevereiro (meio) e março (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.



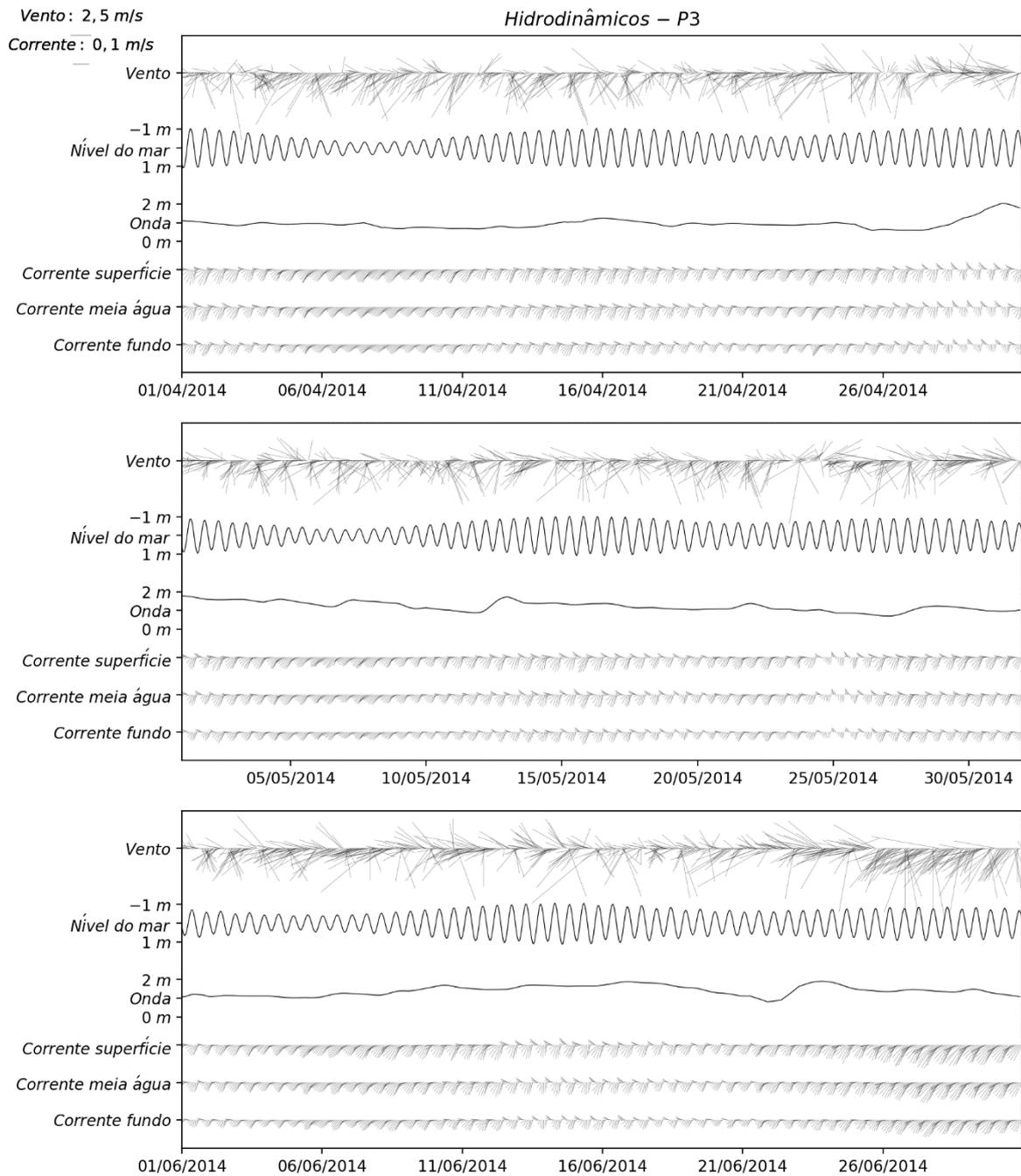
**Figura 19** – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P2 nos meses de janeiro (superior), fevereiro (meio) e março (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.



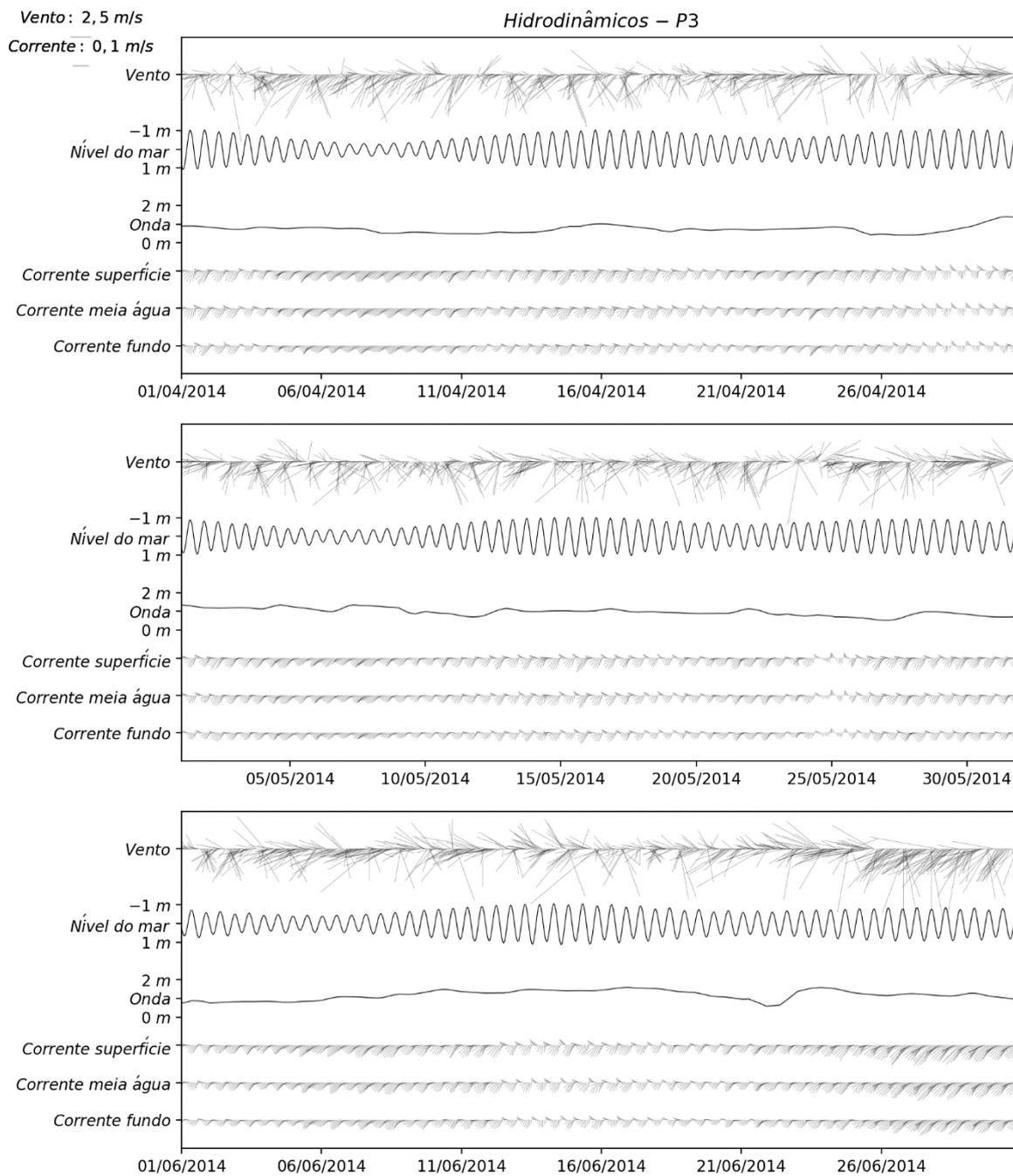
**Figura 20** – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P3 nos meses de janeiro (superior), fevereiro (meio) e março (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.



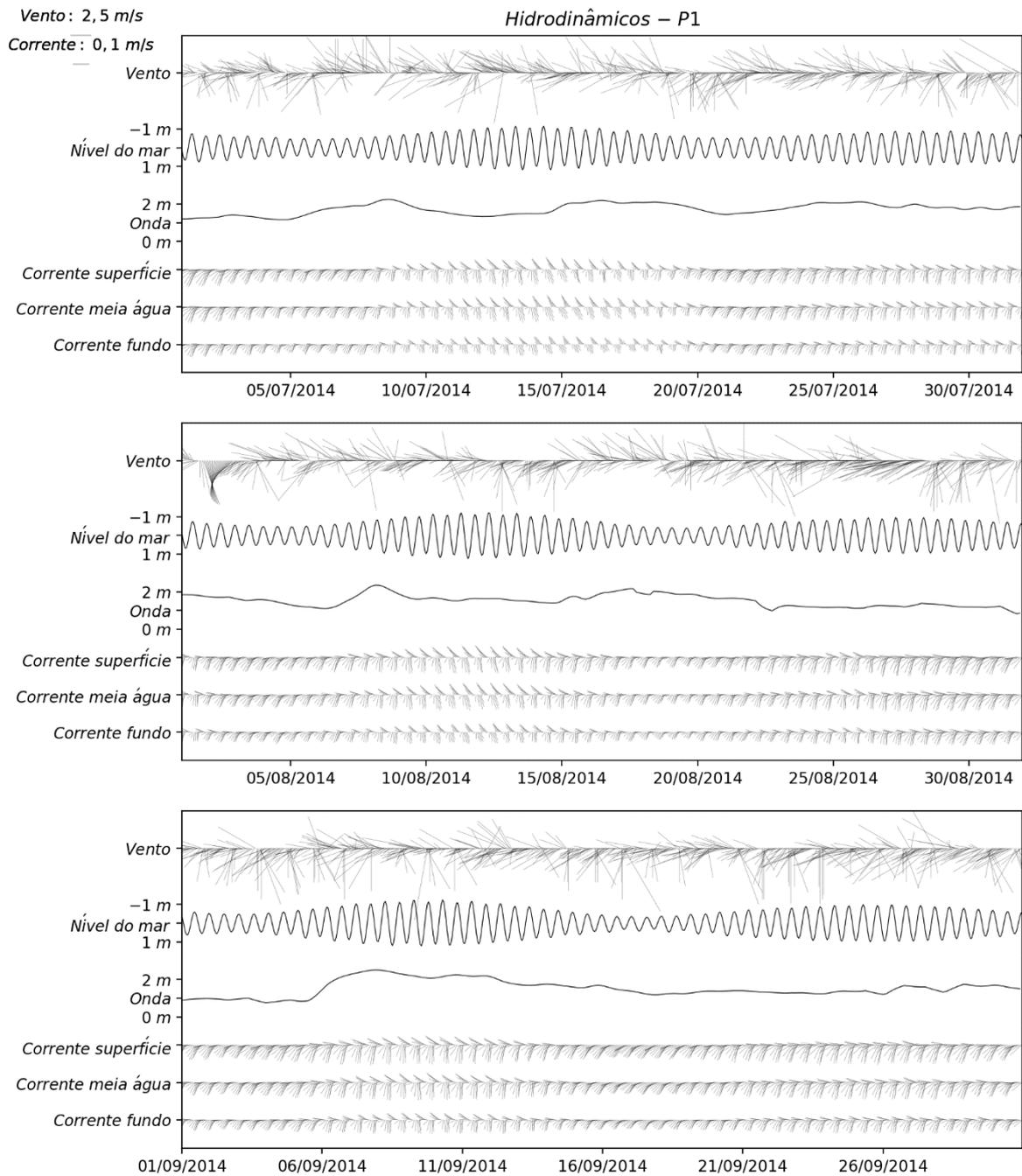
**Figura 21** – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P1 nos meses de abril (superior), maio (meio) e junho (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.



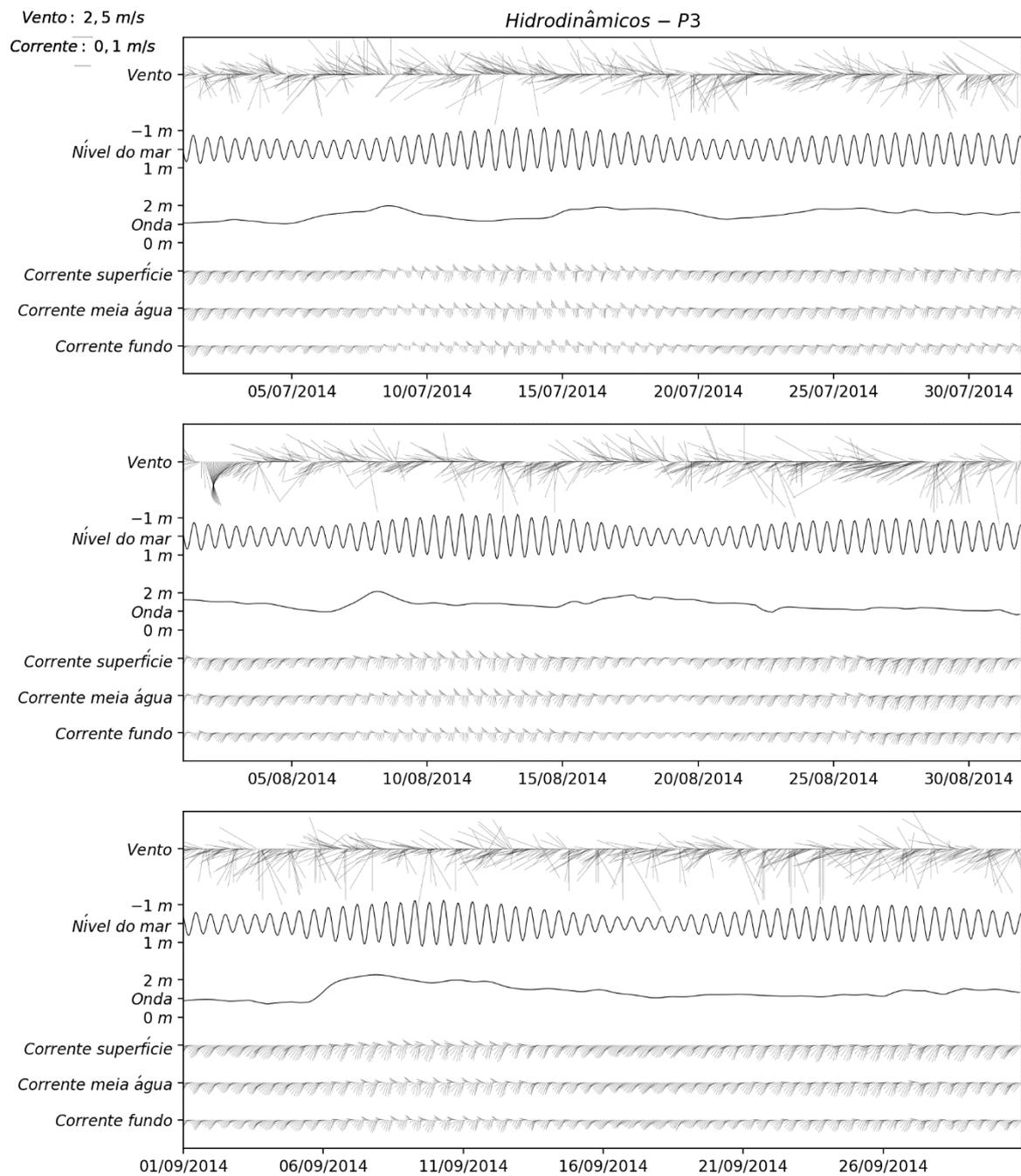
**Figura 22** – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P2 nos meses de abril (superior), maio (meio) e junho (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.



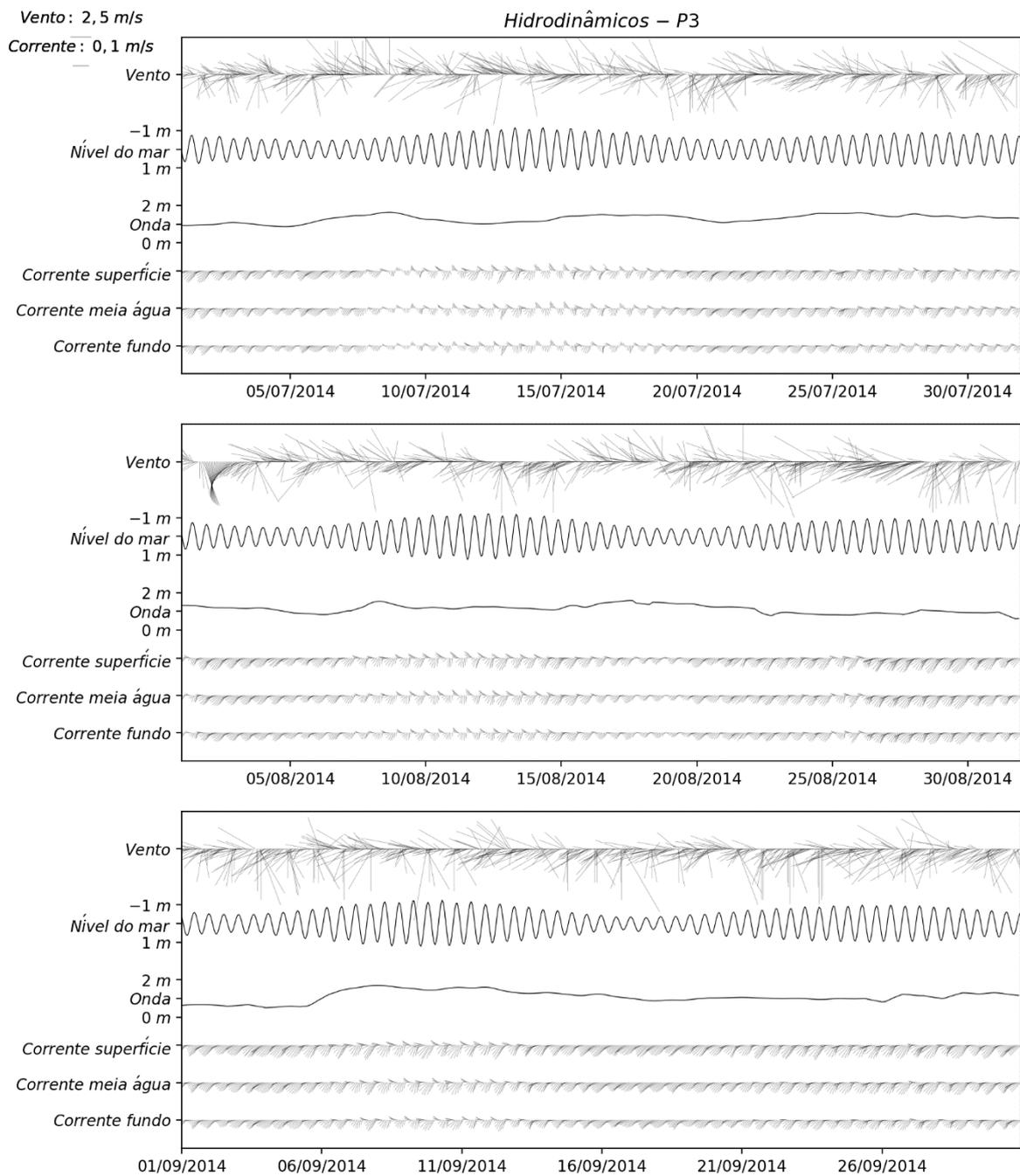
**Figura 23** – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P3 nos meses de abril (superior), maio (meio) e junho (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.



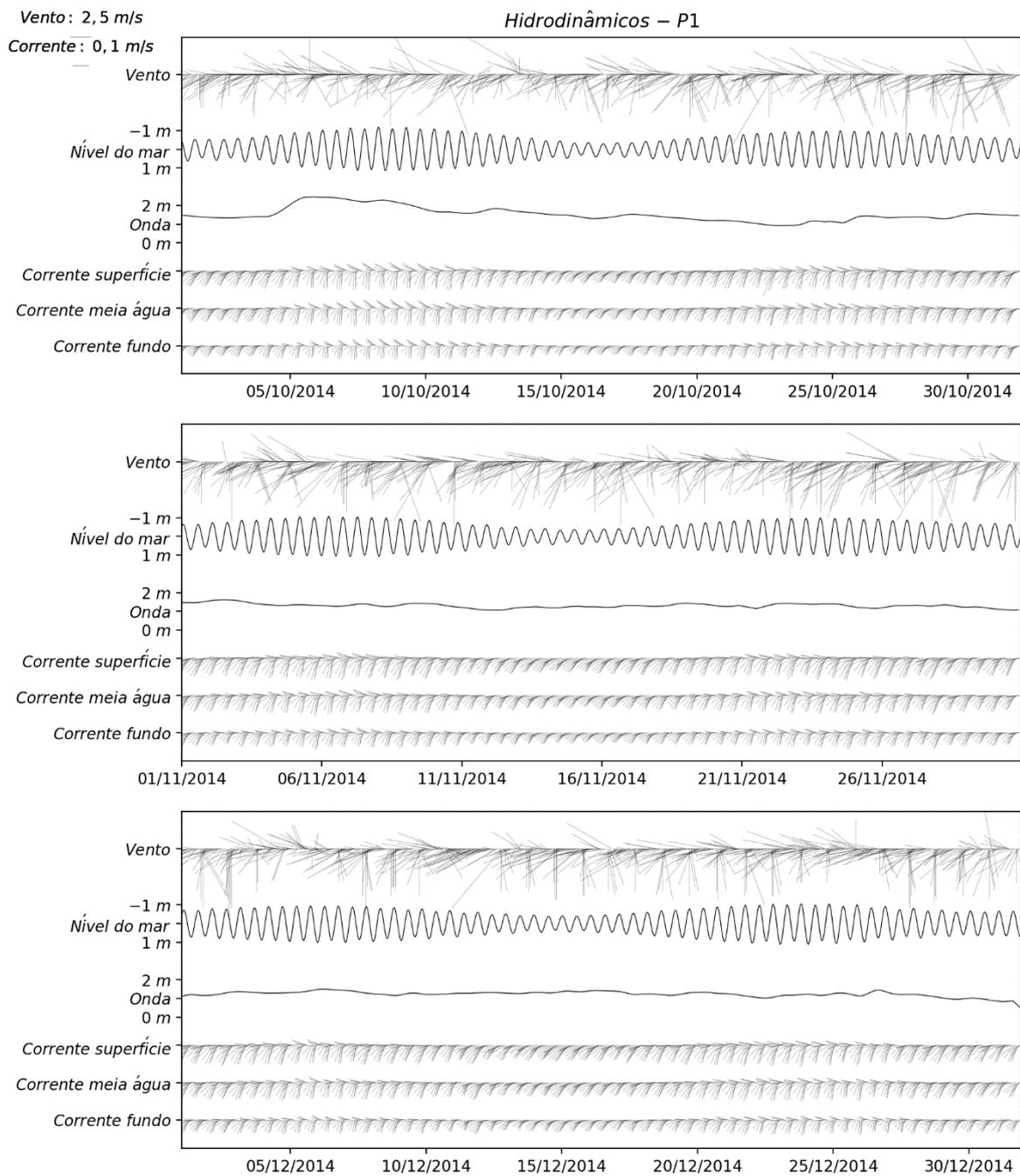
**Figura 24** – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P1 nos meses de julho (superior), agosto (meio) e setembro (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.



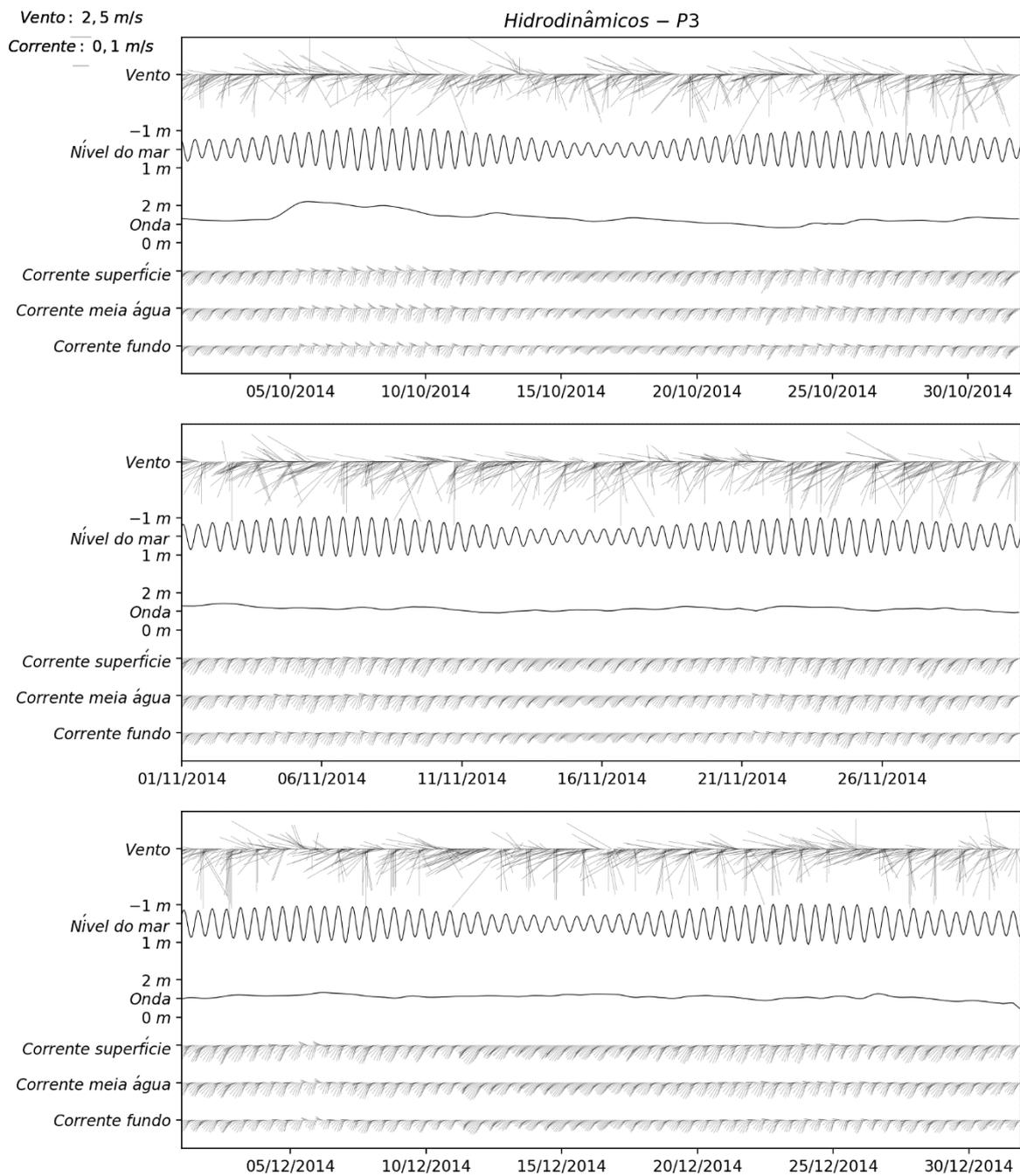
**Figura 25** – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P2 nos meses de julho (superior), agosto (meio) e setembro (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.



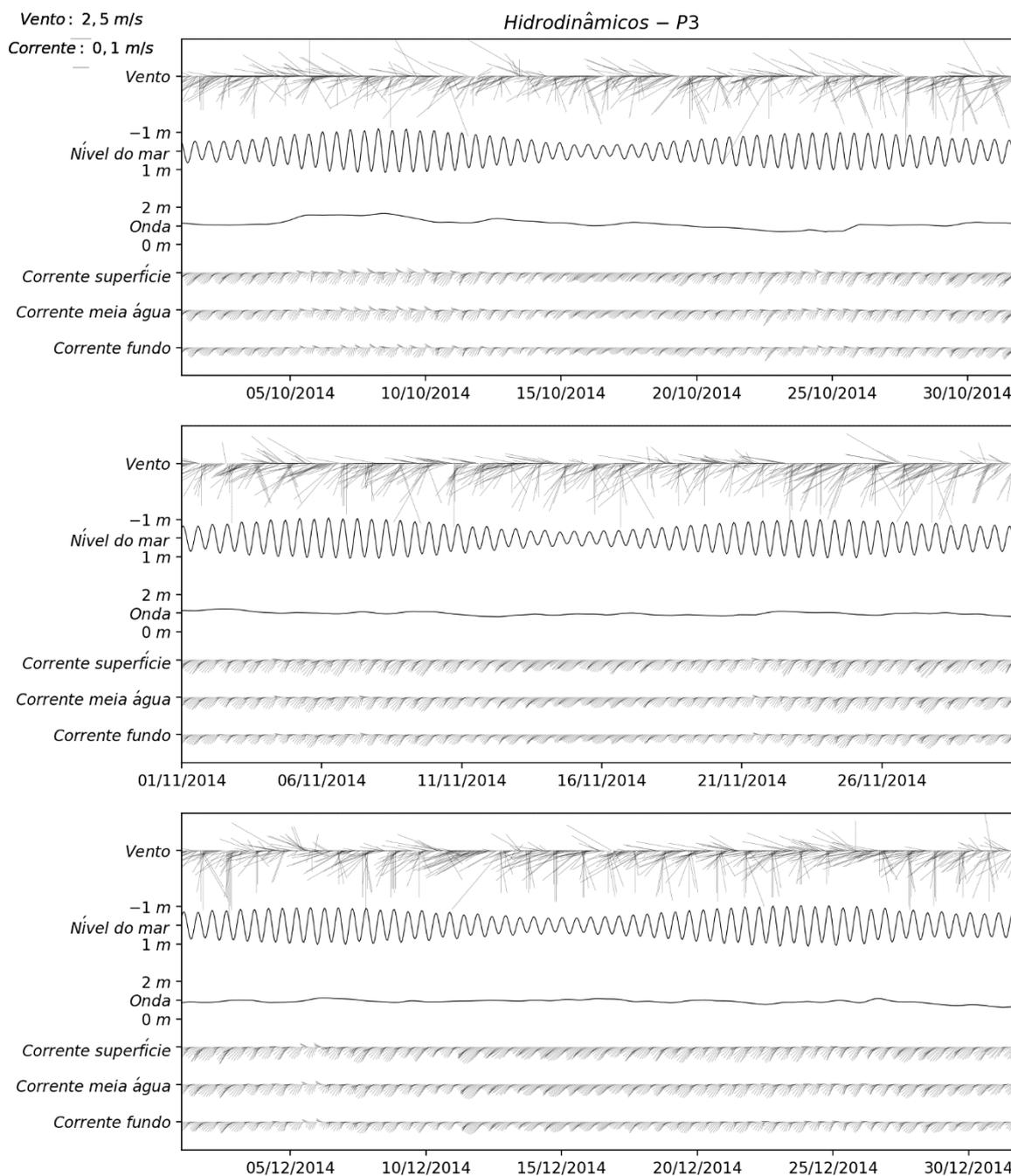
**Figura 26** – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P3 nos meses de julho (superior), agosto (meio) e setembro (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.



**Figura 27** – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P1 nos meses de outubro (superior), novembro (meio) e dezembro (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.



**Figura 28** – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P2 nos meses de outubro (superior), novembro (meio) e dezembro (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.



**Figura 29** – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P3 nos meses de outubro (superior), novembro (meio) e dezembro (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.

Os dados de ventos mostram que a intensidade média no ano de 2014 foi de 3,04 m/s, sendo que a estação seca (outubro a dezembro) foi a que apresentou a maior intensidade média, com 3,51 m/s. Os meses de janeiro-março foi a época do ano com menor intensidade média - 2,80 m/s.

Devido à proximidade dos pontos P1, P2 e P3, os dados de nível apresentam estatísticas semelhantes para ambos os pontos. A amplitude de maré nestes locais foi de 2,34 m, com valor mínimo de 1,10 m

e máximo de 1,24 m. Por se tratar de variações astronômicas, os valores não possuem diferenças significativas entre os períodos analisados.

Com relação às correntes, o ponto P1, mais externo, possui as correntes mais intensas, contraponto o ponto P3, mais próximo a linha de costa, que possui as correntes menos intensas. Analisando ao longo da coluna d'água, em ambos os três pontos os valores de superfície são mais intensos que os modelados para meia água e fundo, mostrando o cisalhamento das correntes. Sazonalmente, as intensidades das correntes mostraram correlação com o apresentado para o vento, com maiores intensidades na estação seca (outubro a dezembro).

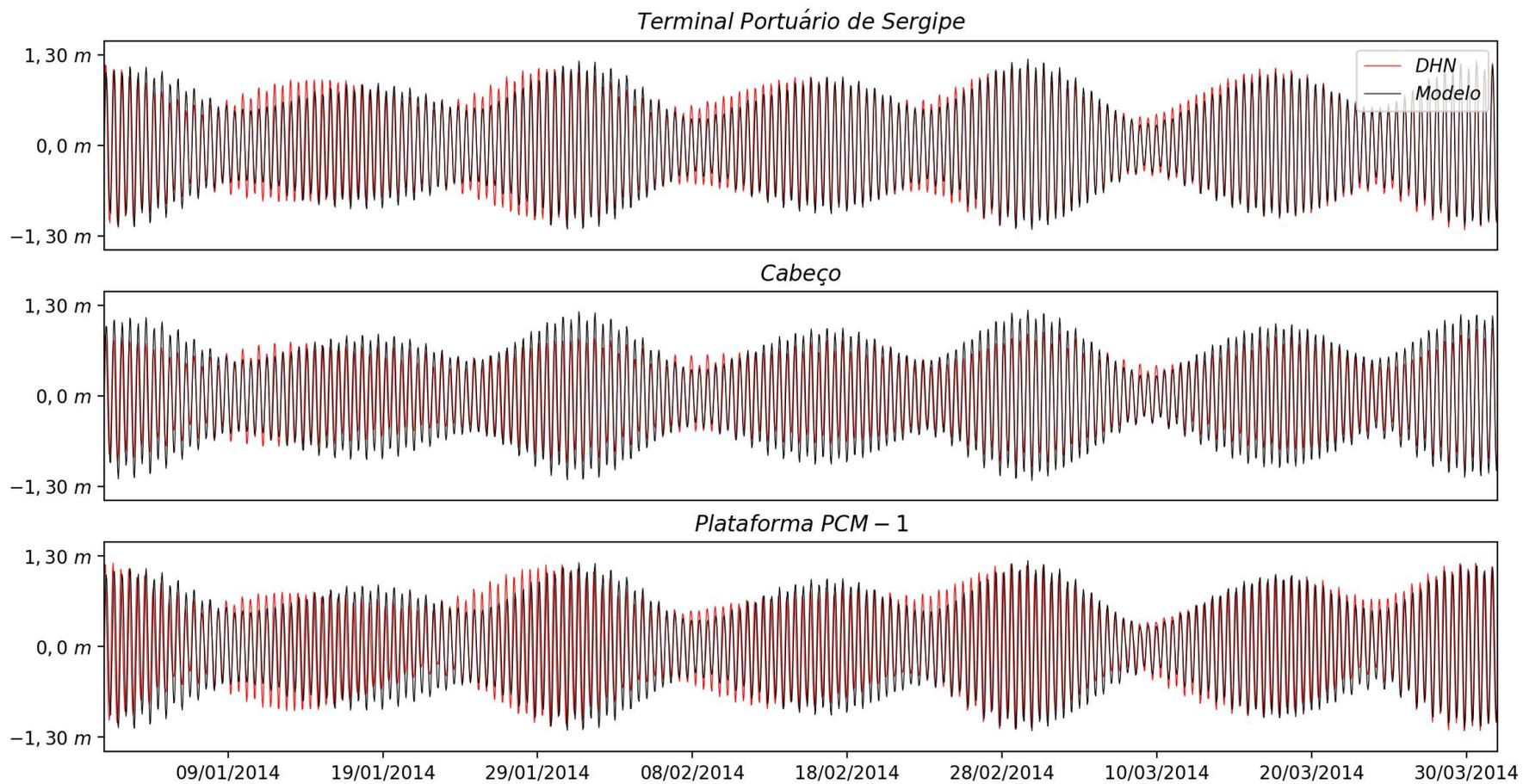
Para analisar o desempenho do modelo hidrodinâmico são comparados os níveis do mar modelados com níveis previsto. Assim, da **Figura 30** a **Figura 32** são mostrados, comparativamente, os níveis modelados e previstos para as simulações. A análise comparativa visual dos níveis modelado e previstos indica uma boa correlação entre as duas séries. De modo a quantificar esta semelhança, foram aplicados os parâmetros estatísticos NRMS e Skill, descritos na **Seção II.3.4**. Os valores obtidos estão apresentados na **Tabela 10** abaixo.

**Tabela 10** - Parâmetros estatístico de comparação entre o nível do mar modelado e o previsto.

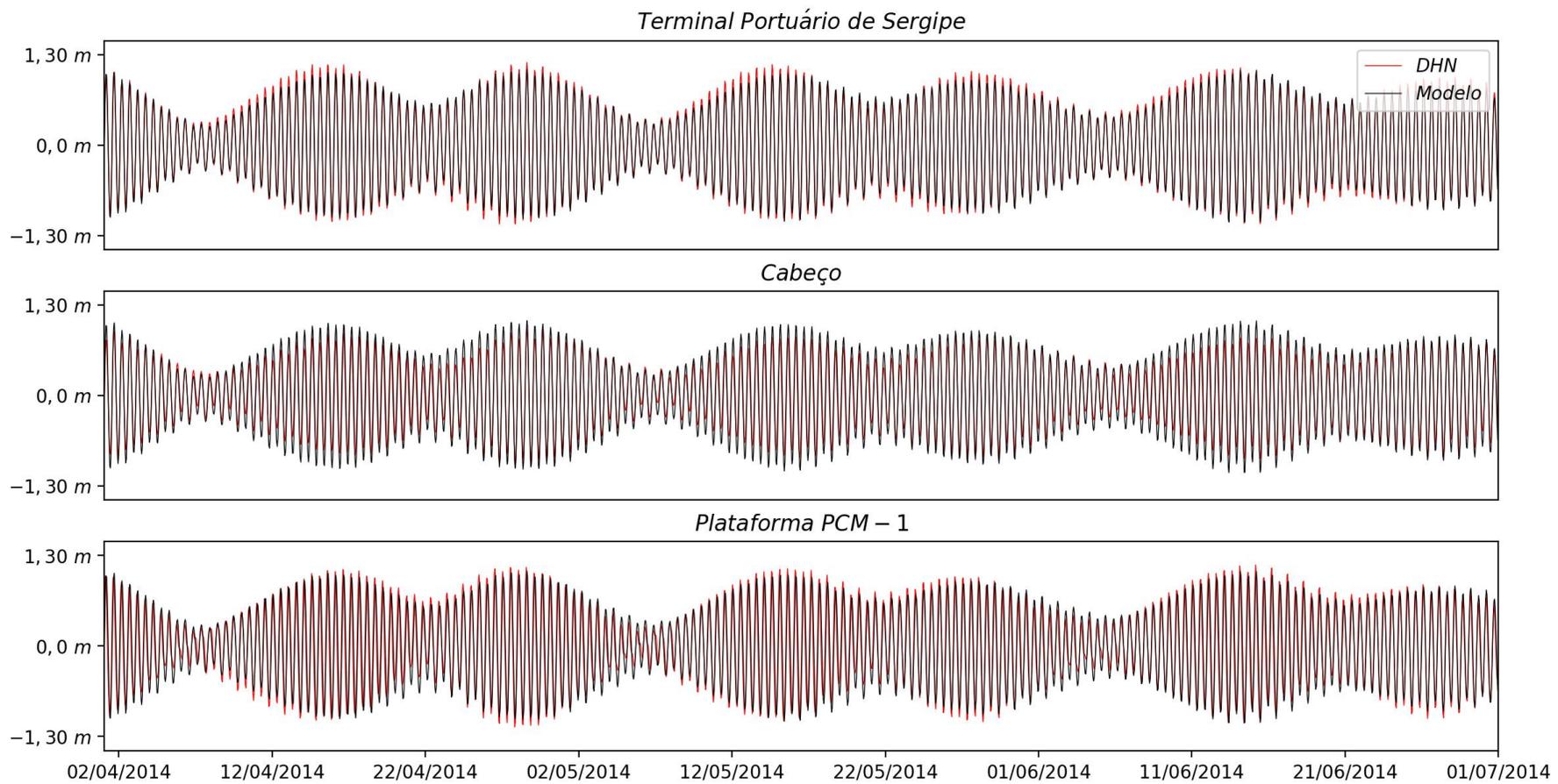
Local	SKILL	NRMS
Terminal Portuário de Sergipe	0,98	0,06
Cabeço	0,96	0,08
Plataforma PCM-1	0,95	0,09

Os valores de Skill, foram extremamente elevados, com valor mínimo de 0,95 (Plataforma PCM-1) e máximo de 0,98 (Terminal Portuário de Sergipe), indicando uma ótima correlação entre as séries – a correlação total é indicada pelo valor 1. Os valores de NRMS, que indicam o erro médio, também mostraram excelentes qualificações, com valor mínimo de 6,0% no Terminal Portuário de Sergipe e valor máximo de 9,0% na Plataforma PCM-1.

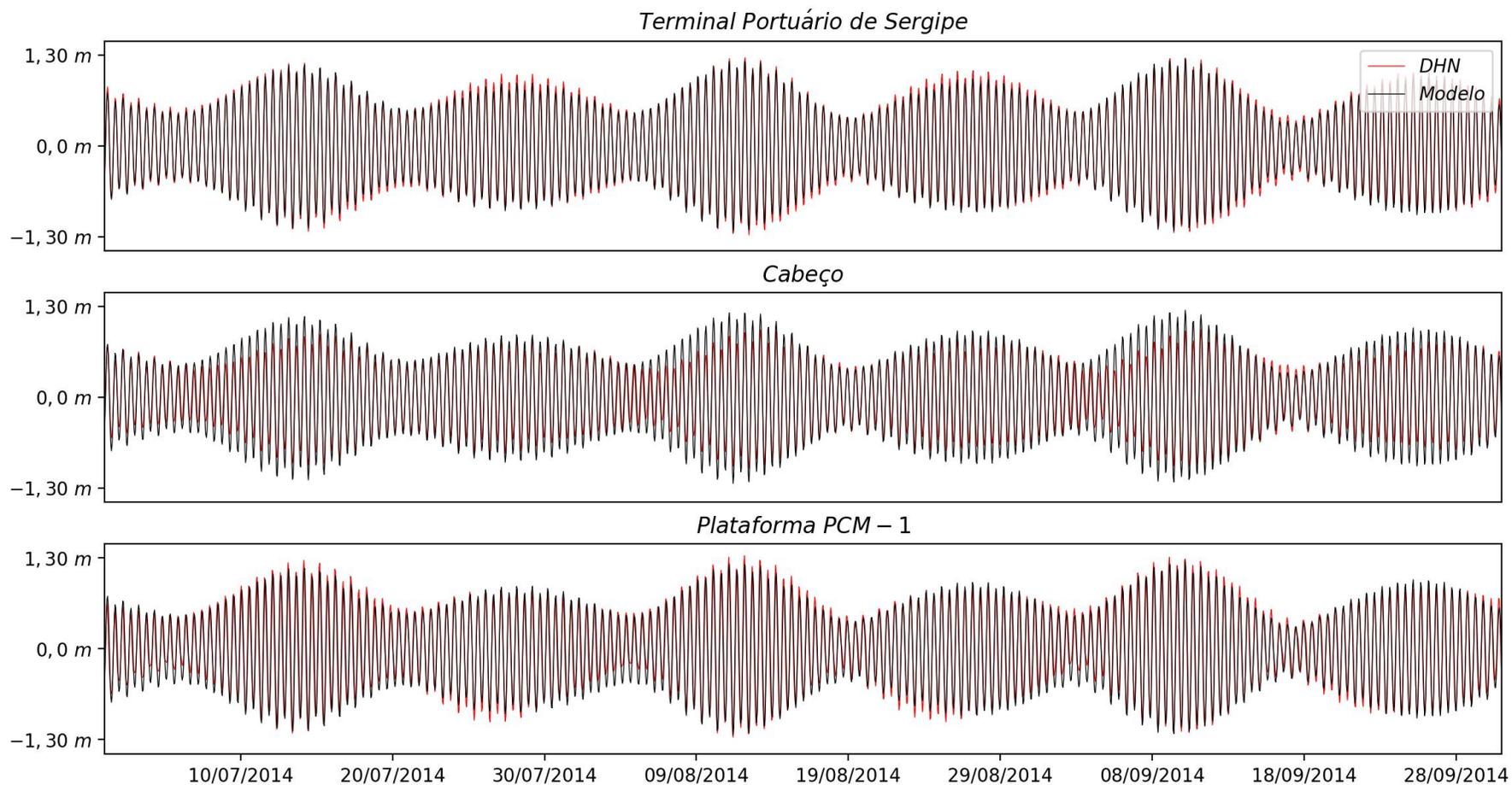
Autores como NOAA (2011), Medeiros *et al.* (2013), Huang (2011) que tiveram valores de Skill para o nível do mar desde 0,7 a 0,9 e valores de NRMS de 0,1 (10%) a 0,2 (20%), classificaram os resultados como plenamente aceitáveis, podendo desta forma atestar os valores aqui obtido como sendo excelentes.



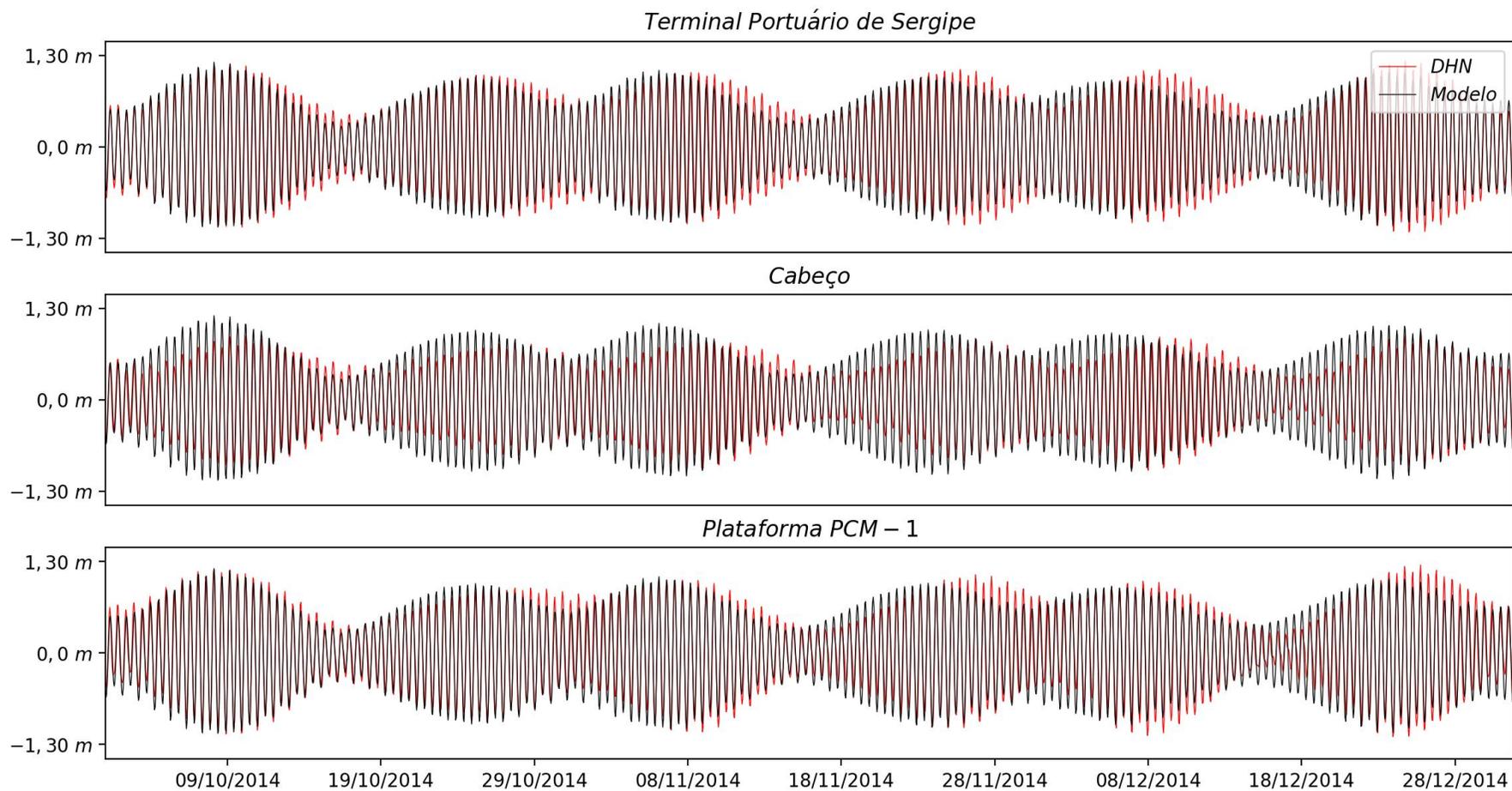
**Figura 30** - Comparação entre o nível do mar modelado e a previsão para o Terminal Portuário de Sergipe (superior), no Cabeço (meio) e na Plataforma PCM-1 (inferior) para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2014.



**Figura 31** - Comparação entre o nível do mar modelado e a previsão para o Terminal Portuário de Sergipe (superior), no Cabeço (meio) e na Plataforma PCM-1 (inferior) para os meses de abril, maio e junho de 2014.



**Figura 32** - Comparação entre o nível do mar modelado e a previsão para o Terminal Portuário de Sergipe (superior), no Cabeço (meio) e na Plataforma PCM-1 (inferior) para os meses de julho, agosto e setembro de 2014.



**Figura 33** - Comparação entre o nível do mar modelado e a previsão para o Terminal Portuário de Sergipe (superior), no Cabeço (meio) e na Plataforma PCM-1 (inferior) para os meses de outubro, novembro e dezembro de 2014.

## IV.2 MODELAGEM DE ONDAS

Da **Tabela 11** a **Tabela 13** estão apresentadas as estatísticas básicas de altura significativa e período de pico para as ondas modeladas nos pontos P1, P2 e P3. A localização destes pontos está apresentada na **Figura 17**.

**Tabela 11** – Estatística básica para a série de ondas modeladas para o ponto P1 no ano de 2014.

Época do ano	Altura (m)				Período (s)			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Anual	1,77	0,78	4,19	0,49	8,93	4,35	20,45	2,27
Janeiro - Fevereiro - Março	1,41	0,78	2,33	0,22	8,24	4,46	17,86	2,28
Abril - Maio - Junho (Estação Chuvosa)	1,79	0,83	4,05	0,5	9,73	4,35	20,45	2,49
Julho - Agosto - Setembro	2,16	1,06	4,19	0,52	9,33	5,73	19,66	1,95
Outubro - Novembro - Dezembro (Estação Seca)	1,7	0,95	3,86	0,35	8,42	4,37	18,78	1,99

**Tabela 19** – Estatística básica para a série de ondas modeladas para o ponto P2 no ano de 2014.

Época do ano	Altura (m)				Período (s)			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Anual	1,2	0,5	2,3	0,3	7,1	4,2	13,7	1,3
Janeiro - Fevereiro - Março	1,0	0,5	1,5	0,2	6,5	4,7	12,3	1,4
Abril - Maio - Junho (Estação Chuvosa)	1,2	0,5	2,1	0,3	7,8	5,5	12,8	1,4
Julho - Agosto - Setembro	1,4	0,7	2,3	0,3	7,5	5,5	13,7	1,2
Outubro - Novembro - Dezembro (Estação Seca)	1,2	0,7	2,2	0,3	6,6	4,2	9,7	0,8

**Tabela 13** – Estatística básica para a série de ondas modeladas para o ponto P3 no ano de 2014.

Época do ano	Altura (m)				Período (s)			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Anual	1,0	0,4	1,7	0,3	7,3	4,2	14,9	1,5
Janeiro - Fevereiro - Março	0,8	0,4	1,3	0,2	6,6	4,8	13,3	1,5
Abril - Maio - Junho (Estação Chuvosa)	1,0	0,4	1,6	0,3	8,1	5,5	13,9	1,6
Julho - Agosto - Setembro	1,2	0,5	1,7	0,3	7,7	5,5	14,9	1,4
Outubro - Novembro - Dezembro (Estação Seca)	1,0	0,6	1,7	0,2	6,7	4,2	9,9	0,8

As estatísticas básicas mostram que as ondas diminuem de altura significativa média conforme se aproxima da linha de costa – P1 é o ponto mais distante e P3 o mais costeiro. No ano de 2014 no ponto P1 a altura significativa média foi de 1,77 m, enquanto que no ponto P3 o valor foi de 1,0 m. Sazonalmente, os maiores valores foram obtidos entre os meses de julho a setembro e o menor de janeiro a março.

Os histogramas direcionais para as ondas nos pontos P1, P2 e P3 estão apresentados na **Tabela 21** a **Tabela 23**.

**Tabela 21** – Histograma de altura e direção de onda modelados para o ponto P1 no ano de 2014.

Anual										
Altura(m)	Direção								Observações	Frequência (%)
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
0,00 - 0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
0,50 - 1,00	0	0	42	307	9	0	0	0	358	12,26
1,00 - 1,50	0	0	374	1373	0	0	0	0	1747	59,83
1,50 - 2,00	0	0	8	593	7	0	0	0	608	20,82
2,00 - 2,50	0	0	0	201	3	0	0	0	204	6,99
2,50 - 3,00	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0,10
3,00 - 3,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
3,50 - 4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
>4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
Observações	0	0	424	2477	19	0	0	0	2920	
Frequência (%)	0,0	0,0	14,5	84,8	0,7	0,0	0,0	0,0		100,0

**Tabela 22** – Histograma de altura e direção de onda modelados para o ponto P2 no ano de 2014.

Anual										
Altura(m)	Direção								Observações	Frequência (%)
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
0,00 - 0,50	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0,03
0,50 - 1,00	0	0	92	653	0	0	0	0	745	25,51
1,00 - 1,50	0	0	54	1650	4	0	0	0	1708	58,49
1,50 - 2,00	0	0	0	417	0	0	0	0	417	14,28
2,00 - 2,50	0	0	0	49	0	0	0	0	49	1,68
2,50 - 3,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
3,00 - 3,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
3,50 - 4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
>4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
Observações	0	0	146	2770	4	0	0	0	2920	
Frequência (%)	0,0	0,0	5,0	94,9	0,1	0,0	0,0	0,0		100,0

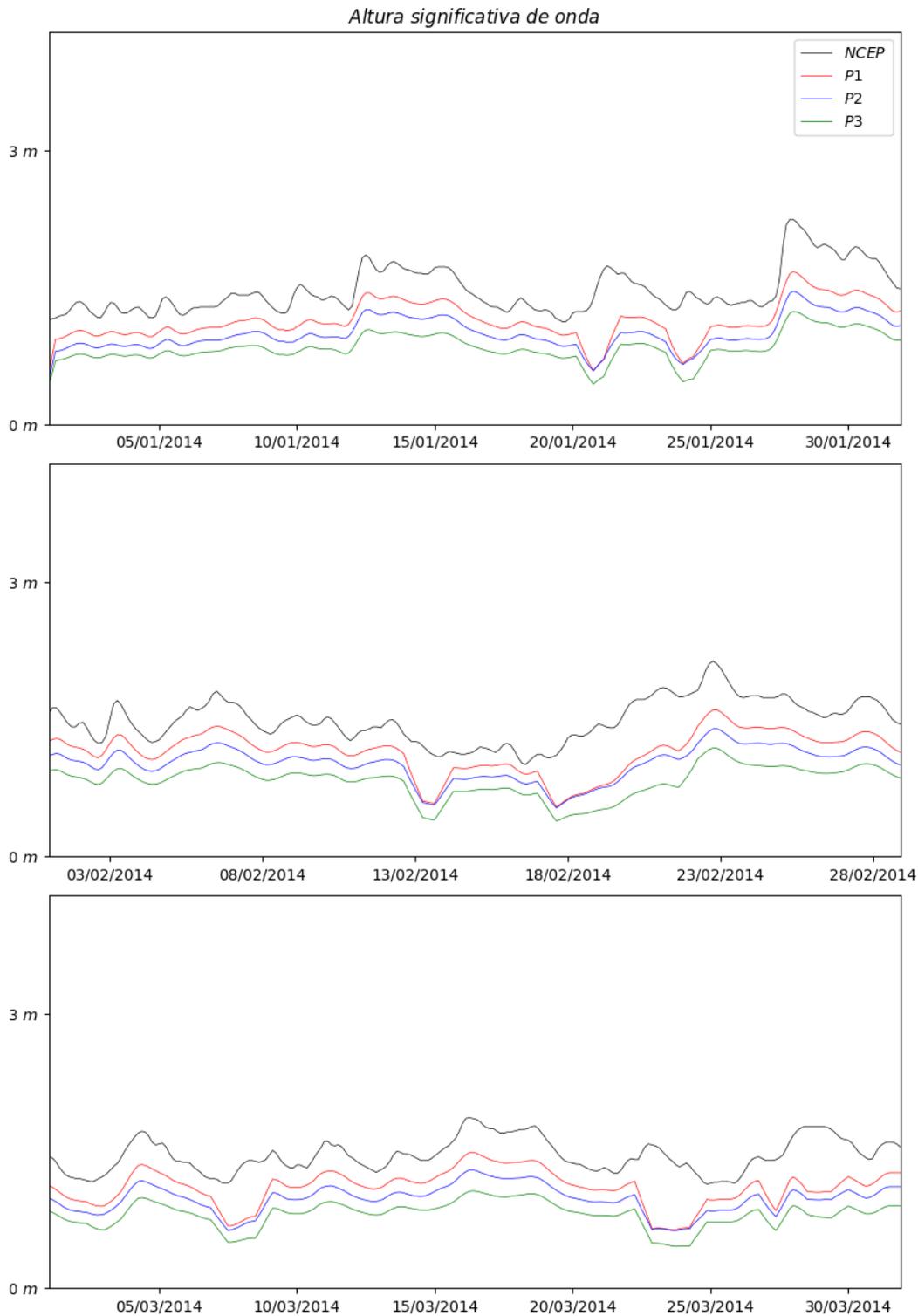
**Tabela 23** – Histograma de altura e direção de onda modelados para o ponto P3 no ano de 2014.

Anual										
Altura(m)	Direção								Observações	Frequência (%)
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
0,00 - 0,50	0	0	0	73	0	0	0	0	73	2,50
0,50 - 1,00	0	0	35	1522	0	0	0	0	1557	53,32
1,00 - 1,50	0	0	0	1138	0	0	0	0	1138	38,97
1,50 - 2,00	0	0	0	152	0	0	0	0	152	5,21
2,00 - 2,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
2,50 - 3,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
3,00 - 3,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
3,50 - 4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
>4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
Observações	0	0	35	2885	0	0	0	0	2920	
Frequência (%)	0,0	0,0	1,2	98,8	0,0	0,0	0,0	0,0		100,0

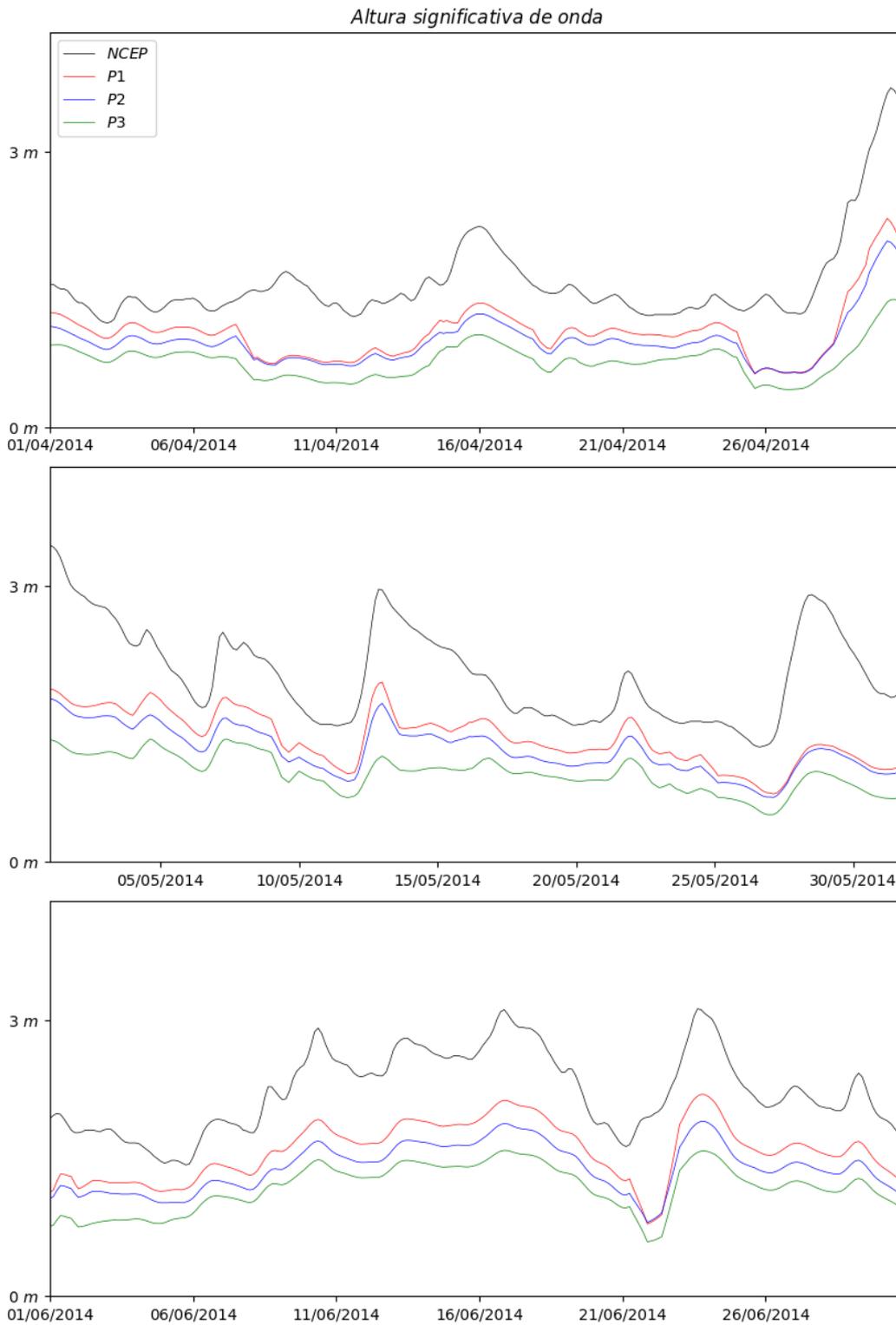
Os histogramas direcionais mostram a difração das ondas conforme o trem de ondas se aproxima da linha de costa. No ponto mais afastado – P1, as ondas possuem direção variando desde E (15% de frequência), SE (85% de frequência) a S (>1% de frequência). Para os pontos mais próximos a linha de costa, P2 e P3, as direções das ondas incidentes são mais restritas – no ponto P3, 99% das ondas possuem origem SE, indicando que neste ponto independente da ondulação ao largo, as ondas refratam e chegam a perpendicularmente a linha de costa.

Da **Figura 34** a **Figura 37** são mostradas as variações temporais de altura significativa de onde nos pontos P1, P2 e P3, bem como a variação desta altura significativa no ponto do NCEP, descrito no item

II.3 deste documento, que serviu como condição de borda para o modelo de ondas, conforme descrito no item III.3.



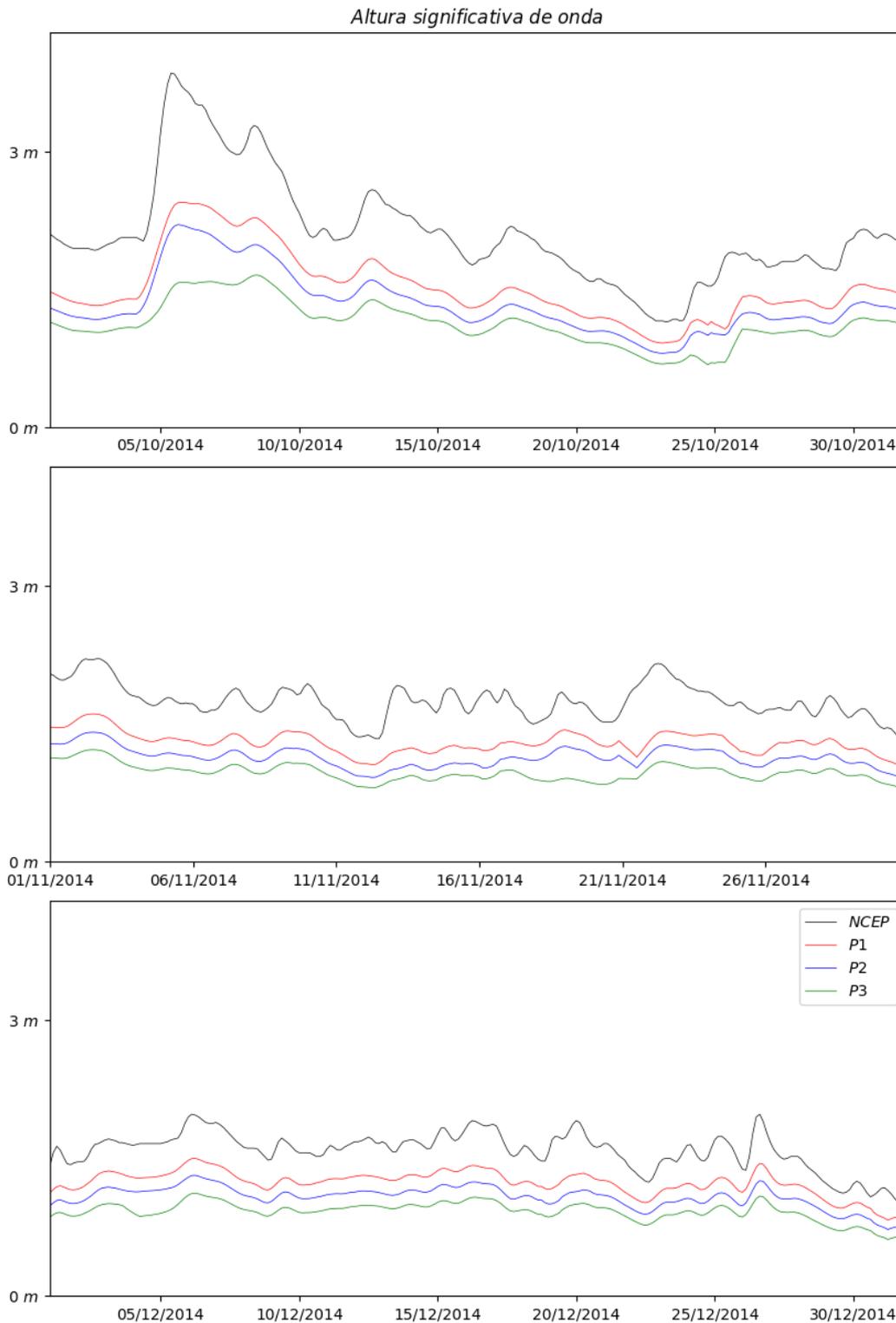
**Figura 34** – *Altura significativa de onda modeladas para os meses de janeiro (superior), fevereiro (meio) e março (inferior) de 2014 ao longo do gasoduto e emissário na costa de Aracajú/SE.*



**Figura 35** – *Altura significativa de onda modeladas para os meses de abril (superior), maio (meio) e junho (inferior) de 2014 ao longo do gasoduto e emissário na costa de Aracajú/SE.*



**Figura 36** – *Altura significativa de onda modeladas para os meses de julho (superior), agosto (meio) e setembro (inferior) de 2014 ao longo do gasoduto e emissário na costa de Aracajú/SE.*

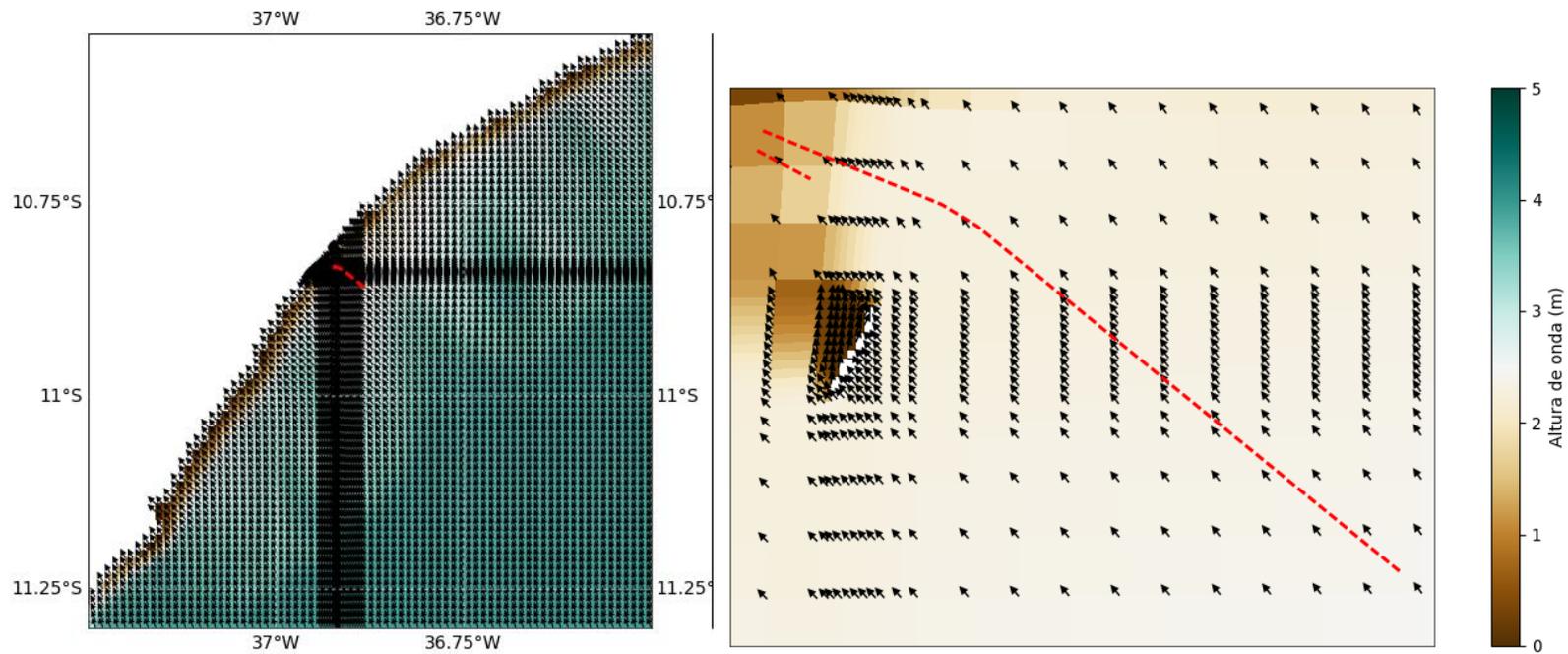


**Figura 37** – *Altura significativa de onda modeladas para os meses de outubro (superior), novembro (meio) e dezembro (inferior) de 2014 ao longo do gasoduto e emissário na costa de Aracajú/SE.*

Estes gráficos mostram que a variação das alturas significativas nos pontos P1, P2 e P3 oscilaram de acordo com o observado para o ponto NCEP, atestando a fidelidade do modelo. Conforme destacado anteriormente, as ondas tendem a perder altura significativa de acordo com que se aproximam da

linha de costa. Pianca *et al.* (2010) validou dados do NCEP na costa do Brasil com dados coletados, atestando que esta fonte de dados possui confiabilidade.

Na série modelada, é possível identificar que a maior altura modelada ocorreu na data de 07/09/2014 – 18h. A **Figura 38** mostra o campo de altura significativa e direção de pico de ondas neste instante, mostrando a diminuição da altura significativa conforme aproxima-se da linha de costa e a refração das ondas, alinhando-se perpendicularmente a linha de costa.



**Figura 38** – Instante de tempo com maior altura significativa modelada para o ano de 2014 (07/09/2014 – 18h) ao longo do gasoduto e emissário na costa de Aracajú/SE. Painel da esquerda toda a área modelada e o painel da direita detalhe da região do gasoduto e emissário (linhas tracejadas em vermelho). Cores mostram a altura significativa de onda (m) e os vetores a direção de pico.

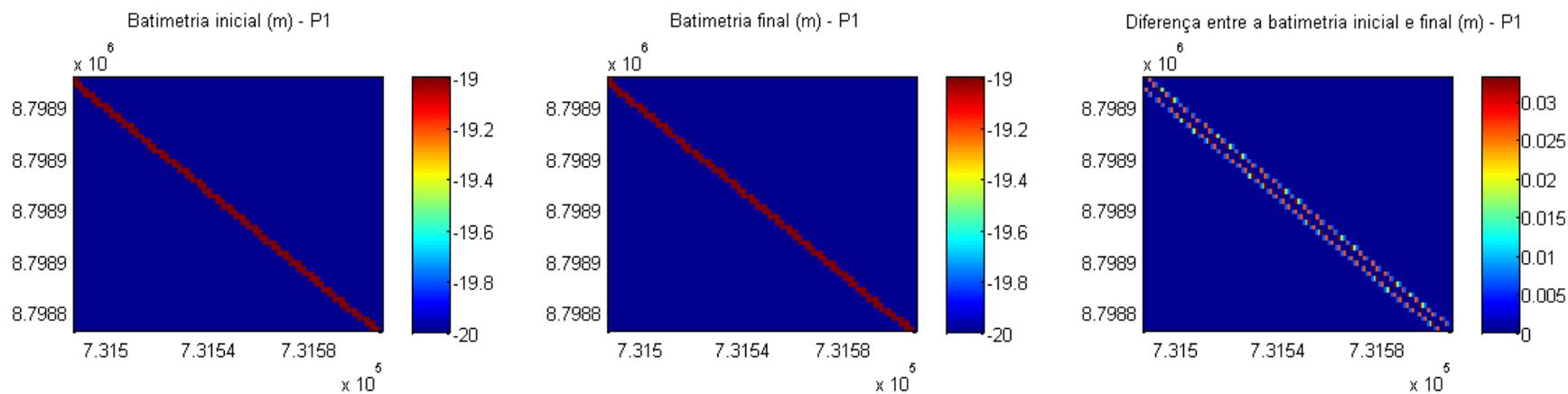
### IV.3 MODELAGEM MORFOLÓGICA

As variações morfodinâmicas provocadas pela instalação do emissário e gasoduto foram extremamente localizadas. Inicialmente optou-se pela confecção de uma grade numérica que abrangesse todo o gasoduto e emissário e, não foi possível identificar nenhuma alteração – possivelmente devido ao pequeno porte dos dutos, com 1 m de diâmetro. Assim, optou-se pela confecção de grades localizadas em trechos dos dutos, extremamente refinadas, de modo a verificar possíveis alterações nas imediações dos mesmos, conforme apresentado no item III.4 deste documento.

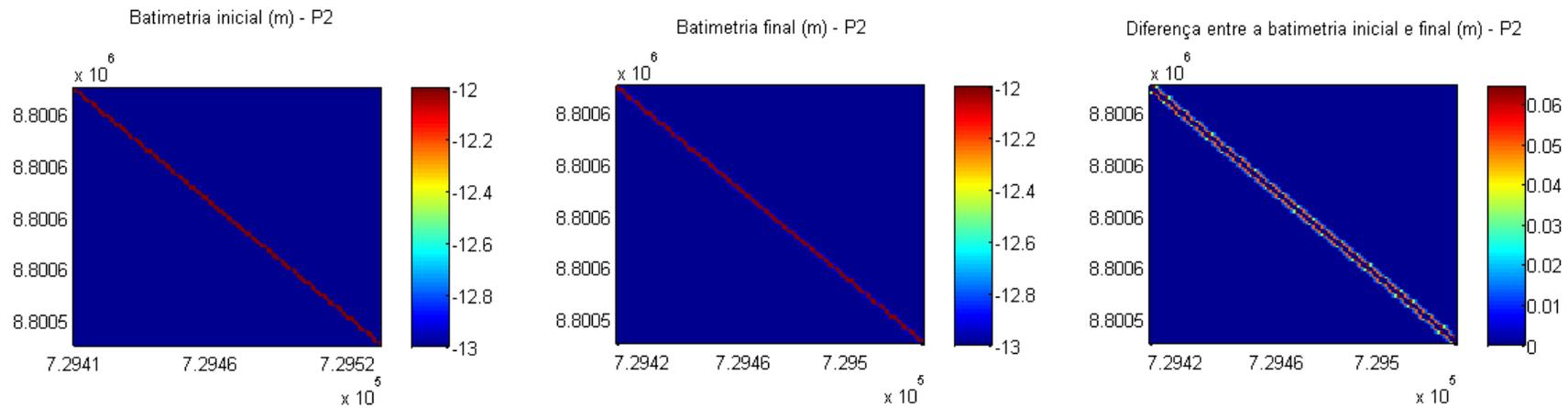
Os resultados batimétricos inicial, final (após um ano de simulação – 2014) e a comparação entre eles estão apresentadas da **Figura 39** a **Figura 41** para os pontos P1, P2 e P3, respectivamente.

Nestas figuras é possível notar que as alterações batimétricas ocorreram somente nas imediações dos dutos, sendo maiores valores no trecho mais próximo a linha de costa (P3). No ponto P1, as maiores alterações batimétricas foram da ordem de 0,03 m. No ponto P2 de 0,07 m e no ponto P3 mais expressivas de 0,5 m com máximos de 0,7 m (50 a 70 cm).

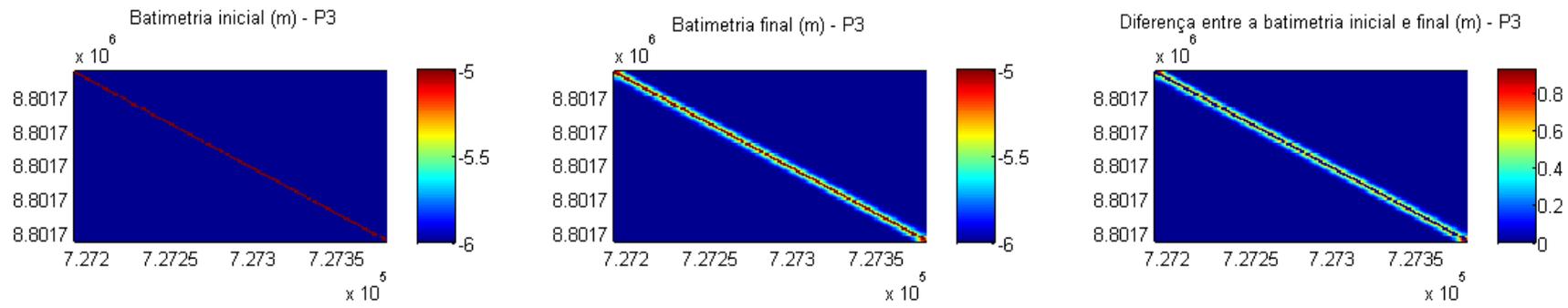
Importante destacar que todas as alterações ocorreram nas células de grades imediatamente ao lado dos dutos, mostrando que as estruturas possuem capacidade de acumular sedimento somente nas suas imediações. E ainda, as alterações ocorreram de maneira similar em ambos os lados dos dutos.



**Figura 39** – Batimetria inicial de simulação (esquerda), batimetria final de simulação (central) e comparação entre ambas (direita) para o ponto P1. Os eixos estão em coordenadas UTM (metros). As cores dos painéis da esquerda e central mostram a batimetria (m). As cores do painel da direita mostram a diferença de batimetria entre o painel da esquerda e o central, onde os valores positivos mostram diminuição da profundidade.



**Figura 40** – Batimetria inicial de simulação (esquerda), batimetria final de simulação (central) e comparação entre ambas (direita) para o ponto P2. Os eixos estão em coordenadas UTM (metros). As cores dos painéis da esquerda e central mostram a batimetria (m). As cores do painel da direita mostram a diferença de batimetria entre o painel da esquerda e o central, onde os valores positivos mostram diminuição da profundidade.



**Figura 41** – Batimetria inicial de simulação (esquerda), batimetria final de simulação (central) e comparação entre ambas (direita) para o ponto P3. Os eixos estão em coordenadas UTM (metros). As cores dos painéis da esquerda e central mostram a batimetria (m). As cores do painel da direita mostram a diferença de batimetria entre o painel da esquerda e o central, onde os valores positivos mostram diminuição da profundidade.

## V.DISSCUSSÃO DOS RESULTADOS

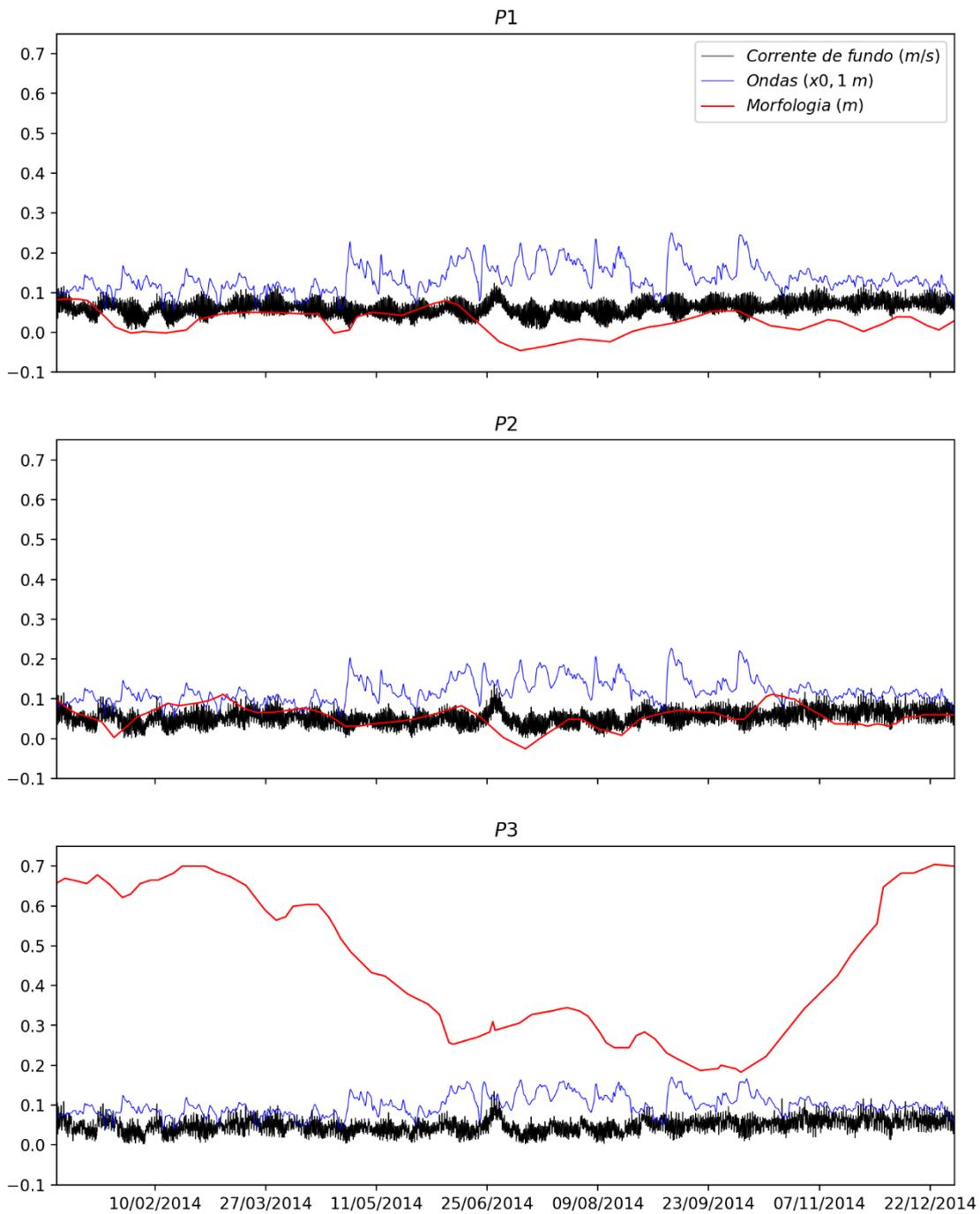
A **Figura 42** mostra a variação temporal da morfologia em ponto ao lado dos dutos nas grades P1, P2 e P3, juntamente com a variação de ondas e corrente de fundo nestes locais. Esta figura apresenta apenas o período onde o modelo morfodinâmico encontra-se estabilizado, isto é, após o tempo de aquecimento do modelo, mencionado no item III.4 deste documento. Como resultado do período de aquecimento, é possível observar variações na batimetria logo no início do período apresentado nos gráficos.

Na figura apresentada é possível notar que o ponto P1, mais distante da costa, apresenta a menor variação morfológica ao longo do ano e aparentemente esta variação está correlacionada com a variação da intensidade da corrente de fundo. Em períodos de maior intensidade ocorreu uma tendência de erosão, enquanto que com correntes mais baixa de deposição. Os valores são sempre inferiores a 10 cm de variação.

O ponto P2 possui variação semelhante ao descrito para o ponto P1, tendo assim, variação aparentemente regida principalmente pela corrente de fundo. As taxas de deposição são levemente superiores ao observado para o ponto P1.

Para o ponto P3 as taxas de deposição são maiores que as observadas para os pontos P1 e P2. Neste local, onde a profundidade é relativamente inferior aos demais (6 m contra 13 m e 20 m, respectivamente), aparentemente as taxas de deposição estão mais correlacionadas às alturas significativas das ondas. Durante os meses maio e setembro, cuja as ondas são mais intensas, as variações ficaram em torno de 20 cm, enquanto que nas épocas de ondas menos intensas, os valores estiveram próximos a 60 cm, que seria aproximadamente a metade do diâmetro dos dutos.

É importante observar que quando a deposição chega próxima dos 60 cm, a região passa a apresentar um equilíbrio dinâmico, permanecendo com a camada de sedimento depositado praticamente com a mesma espessura, até a chegada de períodos de ondas com maiores alturas, onde então ocorre a erosão no local, diminuindo esta deposição para cerca de 20 cm. Após o término dos períodos de ondas maiores na região, a sequência dos eventos de deposição/erosão novamente se repetem, indicando um comportamento cíclico sazonal.



**Figura 42** – Variação da batimetria em ponto ao lado dos dutos nas grades P1 (superior), P2 (meio) e P3 (inferior) – linha vermelha. A linha preta mostra a intensidade da corrente de fundo e a linha azul a altura significativa de onda multiplicado por 0,1 para facilitar a visualização.

## VI.CONCLUSÕES

Foi confeccionado um modelo hidros sedimentar de cobertura regional para simular e prever os efeitos morfodinâmicos e morfossedimentares na região onde se pretende instalar o emissário, a adutora e o gasoduto. As principais conclusões deste estudo são:

- A simulação regional de variação morfodinâmica não apresentou nenhum resultado regional, mostrando que as alterações ocorrem somente de forma localizada ao lado dos dutos;
- Foram confeccionadas três grades de maior resolução em três pontos ao longo dos dutos, nas profundidades de 20, 13 e 6 metros. Nestas localidades, foi constatado que nas mediações distantes de até 1 metro da linha do duto pode ocorrer deposição sedimentar.
- Para o trecho a 20 m de profundidade (P1), a deposição máxima foi da ordem de 3 cm, com taxas de deposição estando aparentemente relacionadas às correntes de fundo;
- Para o trecho a 13 m de profundidade (P2), a deposição máxima foi da ordem de 6 cm, com taxas de deposição estando aparentemente relacionadas às correntes de fundo;
- Para o trecho a 6 m de profundidade (P3), a deposição máxima foi da ordem de 0,7 m. Sendo este trecho mais raso mais influenciado pela altura significativa das ondas, os maiores valores foram registrados em momentos de menor altura de onda. Nos períodos de maior altura de ondas os valores de deposição tiveram médias de 20 cm, sempre ao lado dos dutos;
- Ainda a respeito do trecho a 6 m de profundidade (P3), os resultados indicam que quando a deposição atinge a ordem de 0,7 m, o local apresenta um equilíbrio nos processos deposicionais e erosivos, não permitindo que a região acumule mais sedimentos;
- Assim, a instalação dos dutos não deve alterar significativamente a morfodinâmica da região de implantação, sendo verificada somente deposição de sedimentos ao lado dos tubos, em alturas inferiores ao diâmetro dos mesmos.

## ANEXO A – O MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D-FLOW

No módulo hidrodinâmico DELFT3D-FLOW, as componentes da equação do movimento correspondem às equações do movimento segundo as direções x, y e são representadas pelas equações (1) e (2).

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_x}} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{v}{\sqrt{G_y}} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{w}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_x} \sqrt{G_y}} \frac{\partial \sqrt{G_y}}{\partial x} + \frac{uv}{\sqrt{G_x} \sqrt{G_y}} \frac{\partial \sqrt{G_x}}{\partial y} - f v \\ = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_x}} P_x + F_x + \frac{1}{H^2} \frac{\partial y}{\partial \sigma} \left( \vartheta_{mol} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_x \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_x}} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{v}{\sqrt{G_y}} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{u^2}{\sqrt{G_x} \sqrt{G_y}} \frac{\partial \sqrt{G_y}}{\partial x} + \frac{uv}{\sqrt{G_x} \sqrt{G_y}} \frac{\partial \sqrt{G_x}}{\partial y} + f u \\ = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_y}} P_y + F_y + \frac{1}{H^2} \frac{\partial y}{\partial \sigma} \left( \vartheta_{mol} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_y \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_x} \sqrt{G_y}} \frac{\partial [(d+w)u\sqrt{G_y}]}{\partial x} + \frac{1}{\sqrt{G_x} \sqrt{G_y}} \frac{\partial [(d+w)v\sqrt{G_x}]}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} \\ = H (q_f - q_s) \end{aligned} \quad (3)$$

Nestas equações x, y e z são as três coordenadas espaciais e t é o tempo. u, v e w são as componentes de corrente segundo os eixos x, y e z (respectivamente) e a densidade é simbolizada por  $\rho$ .  $\varphi$  é a elevação da superfície livre,  $\sqrt{G_x}$  e  $\sqrt{G_y}$  são coeficientes de transformação de coordenadas curvilineares para retangulares (aproximação que não considera a esfericidade da Terra), f é o parâmetro de Coriolis, H significa a profundidade,  $\sigma$  é o sistema de coordenada vertical introduzida por PHILLIPS (1957),  $P_x$  e  $P_y$  são os gradientes de pressão hidrostática nas respectivas direções,  $F_x$  e  $F_y$  são os gradientes de tensão radiativa nas respectivas direções,  $\vartheta_{mol}$  o coeficiente de viscosidade cinemática molecular,  $M_x$  e  $M_y$  são fontes ou sorvedouros de momento nas respectivas direções.  $q_f$  são as fontes e  $q_s$  os sorvedouros de água.

Sobre a aproximação de águas rasas, a componente vertical do movimento, na direção z, Equação (3), é reduzida à equação hidrostática:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -\rho g H \quad (4)$$

, onde g se refere à aceleração da gravidade.

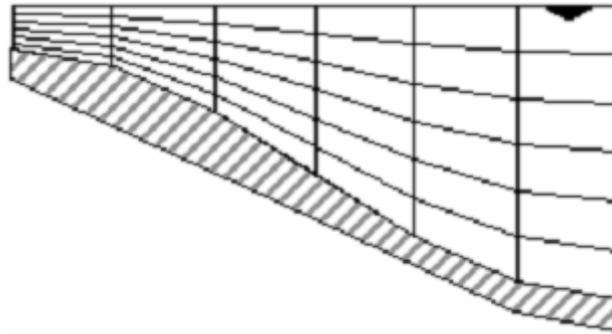
O parâmetro de Coriolis (f) é dependente da latitude geográfica ( $\Theta$ ) e da velocidade angular de rotação da Terra ( $\Omega$ ) (Equação 5).

$$f = 2 \cdot \Omega \cdot \text{sen}(\Theta) \quad (5)$$

Na coordenada  $\sigma$  introduzida por PHILLIPS (1957) para modelos atmosféricos, as camadas verticais da grade numérica são consideradas como sendo planos sigma, onde não são limitadas horizontalmente, acompanhando a topografia de fundo e a superfície livre. Deste modo o número de camadas é constante, independentemente da profundidade local (Figura 1). Isto implica em maior detalhamento em regiões mais rasas, e a relação entre as camadas também pode ser irregular, dando-se preferência

a zonas de interesses, como por exemplo camada de fundo e superfície. Algebricamente a coordenada  $\sigma$  é definida pela equação (6).

$$\sigma = \frac{z - \varphi}{H} \quad (6)$$



**Figura 1** - Exemplo de gr

Fonte: DELTARES (2010).

Derivadas da equação (4) podem ser obtidas as expressões que resolvem os gradientes horizontais de pressão:

$$\frac{1}{\rho\sqrt{G_x}}P_x = \frac{g}{\sqrt{G_x}}\frac{\partial\varphi}{\partial x} + g\frac{H}{\rho\sqrt{G_x}}\int_{\sigma}^0\left(\frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\partial\rho}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial x}\right)d\sigma \quad (7)$$

$$\frac{1}{\rho\sqrt{G_y}}P_y = \frac{g}{\sqrt{G_y}}\frac{\partial\varphi}{\partial y} + g\frac{H}{\rho\sqrt{G_y}}\int_{\sigma}^0\left(\frac{\partial\rho}{\partial y} + \frac{\partial\rho}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial y}\right)d\sigma \quad (8)$$

Nas equações (7) e (8), do lado direito da igualdade, o primeiro termo é referente ao gradiente de pressão barotrópico (variações da superfície livre), e o segundo ao gradiente de pressão baroclínico (variações laterais de densidade).

Os gradientes de tensão radiativa,  $F_x$  e  $F_y$ , são descritos por:

$$F_x = \frac{1}{\sqrt{G_x}}\frac{\partial\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\sqrt{G_y}}\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial y} \quad (9)$$

$$F_y = \frac{1}{\sqrt{G_x}}\frac{\partial\tau_{yx}}{\partial x} + \frac{1}{\sqrt{G_y}}\frac{\partial\tau_{yy}}{\partial y} \quad (10)$$

Os tensores  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yx}$ ,  $\tau_{yy}$  são determinados de acordo com as equações (11), (12) e (13).

$$\tau_{xx} = \frac{2v_H}{\sqrt{G_x}}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial x}\right) \quad (11)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}v\left\{\frac{1}{\sqrt{G_y}}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial y}\right) + \frac{1}{\sqrt{G_x}}\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial x}\right)\right\} \quad (12)$$

$$\tau_{yy} = \frac{2v_H}{\sqrt{G_y}}\left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial y}\right) \quad (13)$$

Para a equação da continuidade, a representação utilizada no DELFT3D-FLOW é:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_x} \sqrt{G_y}} \frac{\partial(H)(U) \sqrt{G_y}}{\partial x} + \frac{1}{\sqrt{G_x} \sqrt{G_y}} \frac{\partial(H)(V) \sqrt{G_x}}{\partial y} = Q \quad (14)$$

, onde U e V significam os transportes por unidade de distância horizontal nas respectivas direções x e y; Q representa as contribuições por unidade de área de descarga ou sumidouro de água. Q é dado por:

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_f - q_s) d\sigma \quad (15)$$

As equações de difusão de sal e calor, tendo  $\lambda$  como processos de decaimento de primeira ordem, S a salinidade e T a temperatura, são representadas por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial HS}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_x} \sqrt{G_y}} \left( \frac{\partial \sqrt{G_x} H u S}{\partial x} + \frac{\partial \sqrt{G_x} H v S}{\partial y} \right) + \frac{\partial w S}{\partial \sigma} \\ = \frac{H}{\sqrt{G_x} \sqrt{G_y}} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{D_H \sqrt{G_y}}{\sigma \sqrt{G_x}} \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \left( \frac{D_H \sqrt{G_x}}{\sigma \sqrt{G_y}} \frac{\partial S}{\partial y} \right) \right\} + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{\vartheta_{mol}}{\sigma_{mol}} + \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) - \lambda H \\ + F_s \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial HT}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_x} \sqrt{G_y}} \left( \frac{\partial \sqrt{G_x} H u T}{\partial x} + \frac{\partial \sqrt{G_x} H v T}{\partial y} \right) + \frac{\partial w T}{\partial \sigma} \\ = \frac{H}{\sqrt{G_x} \sqrt{G_y}} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{D_H \sqrt{G_y}}{\sigma \sqrt{G_x}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \left( \frac{D_H \sqrt{G_x}}{\sigma \sqrt{G_y}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right\} + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{\vartheta_{mol}}{\sigma_{mol}} + \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) - \lambda H \\ + F_t \end{aligned} \quad (17)$$

O sistema de equações é fechado por uma versão da equação de estado que é função de T, S e P (pressão). A versão utilizada é derivada de UNESCO (1981):

$$\rho = \rho_0 + AS + BS^{3/2} + CS^2 \quad (18)$$

Onde,

$$\rho_0 = 999,842594 + 6,793952 \cdot 10^{-2} T - 9,095290 \cdot 10^{-2} T^2 + 1,001685 \cdot 10^{-4} T^3 \\ - 1,120083 \cdot 10^{-6} T^4 + 6,536332 \cdot 10^{-9} T^5$$

$$A = 8,24493 \cdot 10^{-1} - 4,0899 \cdot 10^{-3} T + 7,6438 \cdot 10^{-5} T^2 - 8,2467 \cdot 10^{-7} T^3 + 5,3875 \cdot 10^{-9} T^4$$

$$B = -5,72466 \cdot 10^{-3} + 1,022710 \cdot 10^{-4} T - 1,6546 \cdot 10^{-6} T^2$$

$$C = 4,8324 \cdot 10^{-4}$$

O DELFT3D-FLOW apresenta vários esquemas de fechamento turbulento e é totalmente não linear, inclusive nas parametrizações dos atritos de fundo e superfície. Tendo  $\rho_0$  a densidade de referência da água do mar,  $\vec{u}_b$  a magnitude da velocidade horizontal na primeira camada acima do fundo e  $C_{3D}$  o coeficiente de Chézy, temos o atrito de fundo ( $\vec{\tau}_b$ ) descrito por:

$$\vec{\tau}_b = \frac{g \rho_0 \vec{u}_b |\vec{u}_b|}{C_{3D}^2} \quad (19)$$

Com  $\rho_a$  sendo a densidade do ar,  $U_{10}$  a magnitude da velocidade do vento 10 metros acima da superfície livre (dependente do tempo e do espaço) e  $C_0$  o coeficiente de arrasto dependente de  $U_{10}$ , temos o tensão de cisalhamento do vento com a superfície ( $\vec{\tau}_s$ ) descrito por:

$$|\overline{\tau_s}| = \rho_a C_D U_{10}^2 \quad (20)$$

O coeficiente de arrasto  $C_D$  é dependente da velocidade do vento e é dado por, de acordo com SMITH & BANKE (1975):

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} 0,00063 \text{ se } U_{10} = 0 \text{ (m.s}^{-1}\text{)} \\ \frac{0,00803 U_{10}}{100} \text{ se } 100 \text{(m.s}^{-1}\text{)} < U_{10} < 100 \text{(m.s}^{-1}\text{)} \\ 0,00723 \text{ se } U_{10} > 100 \text{(m.s}^{-1}\text{)} \end{cases} \quad (21)$$

O esquema de fechamento turbulento utilizado foi o denominado modelo k- $\epsilon$ . Neste modelo de turbulência, as equações de transporte são resolvidas para a energia cinética turbulenta (k) e para a dissipação de energia ( $\epsilon$ ). O comprimento da mistura (L) é então determinado de  $\epsilon$  e k de acordo com:

$$L = C_D \frac{k\sqrt{k}}{\epsilon} \quad (22)$$

Nas equações de transporte, as duas seguintes suposições são feitas:

- A produção, o empuxo e a dissipação são os termos dominantes;
- As escalas de distância horizontal são muito maiores que a vertical (águas rasas)

Devido a esta primeira suposição, a conservação das quantidades turbulentas é pouco importante e a equação de transporte é implementada de forma não conservativa.

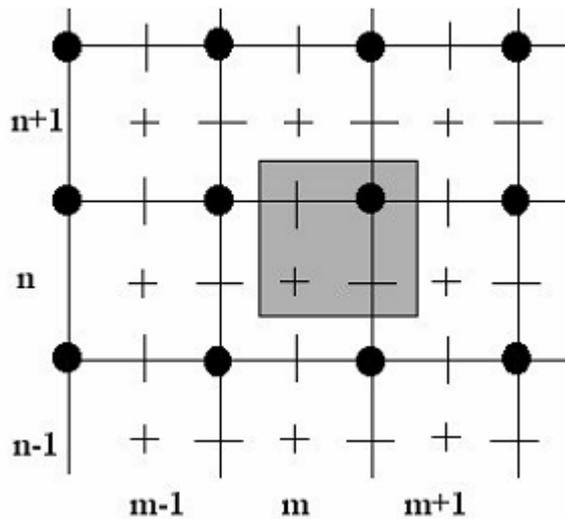
As equações de transporte para k e  $\epsilon$  são acopladas de forma não linear pelas médias de seus coeficientes de difusividades ( $D_k$  e  $D_\epsilon$ ) e termos de dissipação. As equações de transporte para k e  $\epsilon$  são dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{xx}}} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{u}{\sqrt{G_{yy}}} \frac{\partial k}{\partial \eta} + \frac{w}{d + \zeta} \frac{\partial k}{\partial \sigma} \\ = \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( D_K \frac{\partial k}{\partial \sigma} \right) + P_K + P_{Kw} + B_K - \epsilon \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{xx}}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + \frac{u}{\sqrt{G_{yy}}} \frac{\partial \epsilon}{\partial \eta} + \frac{w}{d + \zeta} \frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma} \\ = \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( D_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma} \right) + P_\epsilon + P_{\epsilon w} + B_\epsilon - c_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (24)$$

Onde P são os termos de produção e B os termos de empuxo.  $c_{2\epsilon}$  é termo de calibração e tem valor 1,92.

O método numérico do DELFT3D-FLOW é baseado em diferenças finitas. Para discretizar no espaço as equações demonstradas acima, a área é representada por uma grade curvilínea. A configuração das variáveis na grade é do tipo Arakawa-C, com os pontos de pressão (nível) localizados no centro das células e as componentes de velocidade são situados nas faces, de forma perpendicular, de acordo com a Figura 2.



Onde:

Linhas cheias: grade numérica;

Área cinza: itens com o mesmo índice (m,n);

+ : elevação da superfície, concentração de constituintes, salinidade e temperatura;

- : componente horizontal da velocidade na direção x;

| : componente horizontal da velocidade na direção y;

● : profundidade.

**Figura 2** - Distribuição das variáveis em grade numérica do tipo Arakawa-C.

Fonte: DELTARES (2010).

O esquema numérico implementado no DELFT3D-FLOW utilizado é o WAQUA-scheme, baseado em STELLING (1984) e STELLING & LEENDERTSE (1992), que é uma extensão do consagrado método ADI (Alternating Direction Implicit – KEEDERTSE (1967); LEENDERTSE & GRITTON (1971) e LEENDERTSE *et al.* (1973)), adicionando-se uma aproximação especial para os termos advectivos horizontais.

O método ADI divide cada espaçamento de tempo em dois estágios. Cada estágio se refere a metade do espaçamento de tempo, sendo resolvida todas as equações em ambos. Os níveis de tempo são alternados: se em um estágio o termo é tomado implicitamente no tempo, este termo será levado explicitamente no tempo, no estágio seguinte. Para o passo de tempo completo, cada termo é integrado com precisão de segunda ordem.

A vantagem do método ADI é que as equações integradas implicitamente de elevação do nível da superfície livre e velocidade são acopladas ao longo das linhas da grade numérica, levando o sistema de equações com uma pequena largura de banda.

De forma vetorial, uma exemplificação do método ADI para a velocidade é proposto de acordo com as Equações (25) e (26).

Estágio 1:

$$\frac{\vec{U}^{l+\frac{1}{2}} - \vec{U}^l}{\frac{1}{2}\Delta t} + \frac{1}{2}A_x\vec{U}^{l+\frac{1}{2}} + \frac{1}{2}A_y\vec{U}^l + B\vec{U}^{l+\frac{1}{2}} = \vec{d} \quad (25)$$

Estágio 2:

$$\frac{\vec{U}^{l+1} - \vec{U}^{l+\frac{1}{2}}}{\frac{1}{2}\Delta t} + \frac{1}{2}A_x\vec{U}^{l+\frac{1}{2}} + \frac{1}{2}A_y\vec{U}^{l+1} + B\vec{U}^{l+1} = \vec{d} \quad (26)$$

Onde,

$$A_x = \begin{bmatrix} 0 & -f & g \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ H \frac{\partial}{\partial x} & 0 & u \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}$$

$$A_y = \begin{bmatrix} u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 0 \\ f & 0 & g \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & H \frac{\partial}{\partial y} & v \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \mu & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}$$

Com  $\mu$  sendo o coeficiente de atrito de fundo linearizado e  $\vec{d}$  forçantes externas como vento e pressão atmosférica.

## ANEXO B – O MODELO DE ONDA DELFT-WAVE

O WAVE é o módulo de ondas do DELFT3D que simula basicamente a propagação de ondas; geração de onda a partir do vento; interações não lineares entre onda-onda e dissipação de energia para uma determinada topografia de fundo, campo de vento, nível de água e campos de correntes, em águas rasas intermediárias e profundas. Neste módulo é implementado o modelo de terceira geração SWAN (Simulating Waves Nearshore) que leva em consideração a evolução de ondas aleatórias de curto comprimento de onda em regiões costeiras de águas rasas, intermediárias e profundas com influência de correntes, considerando a refração devido a estas correntes e variações de batimetria, reproduzindo também processos de difração, geração de ondas pelo vento, quebra induzida pelo fundo e pela corrente.

Suas formulações se aplicam aos processos de ondas em águas rasas, como fricção com o fundo, difração e quebra de onda. Sua principal característica é a interação dinâmica com o módulo hidrodinâmico Delft3D – FLOW, interagindo onda-corrente. Por isso o efeito das ondas em correntes e o efeito do fluxo em ondas são contabilizados.

O modelo SWAN se baseia na equação discreta do balanço de ação espectral, sendo totalmente espectral em todas as direções e frequências. Nele as ondas são descritas pela densidade espectral bidimensional da ação de ondas  $N(\sigma, \theta)$  (conservada em presença de correntes), inclusive quando fenômenos não lineares predominam. As variáveis independentes são a frequência relativa  $\sigma$  (observada em um amplo plano de referência se movendo com a velocidade da corrente) e a direção da onda  $\theta$  (direção normal às cristas de ondas de cada componente espectral), sendo que a densidade de ação é igual à densidade de energia dividida pela frequência relativa.

A difração implementada no SWAN é a aproximação da refração-difração com fase desacoplada para modelos de ondas espectrais. A equação do balanço da ação espectral é dada por:

$$\frac{\partial N(\sigma, \theta)}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x} N(\sigma, \theta)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y} N(\sigma, \theta)}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta} N(\sigma, \theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial c_{\sigma} N(\sigma, \theta)}{\partial \sigma} = \frac{S(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

\*1

\*2

\*3

\*4

\*5

\*6

Onde:

$N(\sigma, \theta)$  = densidade de ação da onda;

$S(\sigma, \theta)$  = fonte/sumidouro em termos de densidade de energia;

$x, y$  = distância em  $x$  e  $y$  (m);

$c_{x,y,\sigma,\theta}$  = velocidade de propagação para  $x, y, \sigma, \theta$  (m/s);

$\sigma$  = frequência relativa (Hz);

$\theta$  = direção de onda (°).

Os termos numerados na equação acima representam:

- \*1 – Taxa local de variação de ação no tempo;
- \*2 e \*3 – Propagação de ação no espaço, com velocidades de propagação e nos eixos  $x$  e  $y$ , respectivamente;

- \*4 – Refração induzida pela profundidade e por correntes, com velocidade de propagação no eixo ;
- \*5 – Mudança da frequência relativa devido a variações na profundidade e nas correntes;
- \*6 – Termo fonte em relação à densidade de energia representando os efeitos de geração, dissipação e interação não linear onda-onda.

Em resumo, os processos hidrodinâmicos e de ondas, alimentam o módulo de transporte de sedimentos, que suporta transporte por suspensão e por carga de tração para sedimentos não coesivos e suspensão para sedimentos coesivos. À medida que o cálculo do transporte por tração é solucionado pela transferência de momento do fluido para o sedimento, aquele referente à carga em suspensão é formulado por equações de advecção e difusão.

## ANEXO C – O MODELO DE MORFOLOGIA DELFT3D-MOR

Segundo Deltares (2010), o módulo de transporte de sedimento (SED) e o módulo de morfologia suportam tanto transporte de carga de leito e carga suspensa de sedimentos não-coesivos quanto carga suspensa de sedimentos coesivos.

O limite entre sedimento coesivo e sedimento não-coesivo é obscuro. Em geral, sedimentos muito menores que 2 µm são considerados coesivos. Sedimentos muito maiores que 60 µm são considerados não-coesivos.

Sedimentos coesivos são compostos de material com tamanho semelhante ao da argila e com intensa força iônica entre as partículas. Os sedimentos coesivos consistem de minerais inorgânicos (minerais argilosos e não-argilosos) e material orgânico (detritos de plantas e animais e bactérias).

### Transporte de Carga Suspensa

Segundo Deltares (2010), a equação da advecção-difusão é empregada no transporte de sedimento suspenso:

$$\frac{\partial[Hc]}{\partial t} + \frac{\partial[HUc]}{\partial x} + \frac{\partial[HVc]}{\partial y} + \frac{\partial(\omega c)}{\partial \sigma} = H \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_H \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_H \frac{\partial c}{\partial y} \right) \right] + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ D_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right] + HS$$

onde,

$c$  é a concentração de sedimento ( $\text{kg/m}^3$ );

$S$  é a indicação da fonte e do sumidouro por unidade de área;

$D_H$  e  $D_V$  são as difusividades horizontal e vertical, respectivamente;

$\omega$  é a vorticidade;

$\sigma$  é a coordenada vertical.

## Transporte de Carga de Leito

Para o transporte de carga de leito, Deltares (2010) mostra que o Delft3D emprega a equação:

$$|S_b| = 0,006\rho_s\omega_s d_{50}^{(l)} M^{0.5} M_e^{0.7}$$

onde,

$S_b$  é a taxa de transporte de carga de leito para o diâmetro mediano  $d_{50}$ ;

$\omega_s$  é a velocidade de queda da partícula de sedimento;

$M$  é a mobilidade do sedimento devido às ondas e correntes;

$M_e$  é a mobilidade do excesso de sedimento.

## Atualização da Morfologia

A elevação do leito é atualizada a cada passo de tempo durante a simulação. Isso ocorre porque a mudança na massa de material do leito é calculada como resultado dos gradientes de transporte e dos termos fonte e sumidouro de sedimento.

A mudança na quantidade de sedimentos no fundo causados pelo transporte de carga de leito é calculada pela equação:

$$\Delta_{SED}^{(m,n)} = \frac{\Delta t f_{MORFAC}}{A^{(m,n)}} \left( S_{b,uu}^{(m-1,n)} \Delta y^{(m-1,n)} - S_{b,uu}^{(m,n)} \Delta y^{(m,n)} + S_{b,vv}^{(m,n-1)} \Delta x^{(m,n-1)} - S_{b,vv}^{(m,n)} \Delta x^{(m,n)} \right)$$

onde,

$\Delta_{SED}^{(m,n)}$  é a mudança na quantidade de sedimento na localidade  $(m,n)$ ;

$\Delta t$  é o passo de tempo computacional;

$f_{MORFAC}$  é o fator de aceleração morfológica, MORFAC (descrito no item a seguir);

$A^{(m,n)}$  é a área da célula computacional na localidade  $(m,n)$ ;

$S_{b,uu}^{(m,n)}$  e  $S_{b,vv}^{(m,n)}$  são os vetores de transporte do sedimento de carga de leito calculada nas direções  $u$  e  $v$ , respectivamente;

$\Delta x^{(m,n)}$  é a largura da célula na direção  $x$ ;

$\Delta y^{(m,n)}$  é a largura da célula na direção  $y$ .

## Fator da Escala Morfológica

De acordo com Deltares (2010), as mudanças morfológicas acontecem em escalas de tempo muito maiores que as mudanças hidrodinâmicas. Para minimizar os efeitos desse fato o Delft3D apresenta o fator temporal de escala de morfológica ( $f_{MORFAC}$ ), que acelera os efeitos morfológicos durante as simulações. Os fluxos de erosão e deposição entre o leito e o escoamento são multiplicados por esse

fator em cada passo de tempo. As alterações no nível do leito ajustado são incorporadas nos cálculos do escoamento hidrodinâmico. De forma mais simplificada,  $f_{MORFAC}$  é definido como:

$$f_{MORFAC} = \frac{\textit{tempo morfológico}}{\textit{tempo hidrodinâmico}}$$

Como exemplo, para um fator de escala morfológica igual a 30, em uma simulação de um dia, mudanças morfológicas de 30 dias serão simuladas. O uso do  $f_{MORFAC}$  também reduz o tempo computacional das simulações.