

II.5.1.2 - Oceanografia

A) Introdução

A costa norte da Região Nordeste brasileira tem seus parâmetros oceanográficos controlados pelos modos de variabilidade típicos da Zona Equatorial do planeta. Enquanto que as propriedades físico-químicas da água estão associadas ao padrão termodinâmico do Oceano Atlântico Tropical e suas interações com atmosfera, sob o ponto de vista dinâmico a região oceânica é regida por três agentes principais: a circulação de larga escala do Oceano Atlântico Sul, através do fluxo unidirecional da Corrente Norte do Brasil; o ciclo de marés e o regime de ventos locais.

No presente texto, a caracterização dos parâmetros oceanográficos na área de influência do Campo de Siri é feita com base na análise de dados oriundos da implementação de programas de monitoramento ambiental na região e de bases de dados públicas, de climatologias derivadas de dados de sensores remotos e de informações disponíveis em literatura científica.

Deve-se ressaltar que a compreensão do comportamento dinâmico nesta região permitiu o estabelecimento de uma base hidrodinâmica para a área das Bacias do Ceará e Rio Grande do Norte, que, por sua vez, foi utilizada para a simulação de cenários de derrame de óleo no Campo de Siri e, posteriormente, o estabelecimento da área de influência da atividade, como descrito pela Seção II.4 deste relatório.

B) Aspectos gerais

Resultante do aquecimento diferencial do Oceano Atlântico Tropical ao longo do ano, o chamado Padrão Dipolo do Atlântico é, segundo Hastenrath & Heller (1977) e Uvo *et al.* (1994), o modo de variabilidade oceano-atmosfera dominante sobre esta bacia oceânica. Como discutido anteriormente na seção de Meteorologia (Item II.5.1.1), tal padrão é caracterizado pela manifestação simultânea de anomalias de temperatura da superfície do mar entre as bacias norte e sul, gerando gradientes de pressão atmosférica em escala inter-

hemisférica que, por sua vez, agem no deslocamento meridional da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Por constituir-se no principal sistema meteorológico controlador de precipitação na região nordeste, a ZCIT tem efeitos significativos sobre as propriedades físico-químicas oceânicas na região.

No tocante ao regime hidrodinâmico em larga escala, a circulação superficial no Atlântico Sul é forçada em grande parte pelos ventos alísios, que determinam o giro subtropical no sentido anti-ciclônico (anti-horário no hemisfério sul). A Corrente Sul-Equatorial, integrante deste giro, atravessa zonalmente a bacia atlântica e, ao se aproximar da costa brasileira, em torno da latitude de 12°S, é bifurcada em dois ramos (Stramma & Schott, 1999), como ilustrado pela Figura II.5.1.2-1. Enquanto o ramo que migra para sul origina a Corrente do Brasil (CB), o ramo noroeste, denominado de Corrente Norte do Brasil (CNB), fecha o giro equatorial e flui sobre toda a região oceânica da costa norte brasileira.

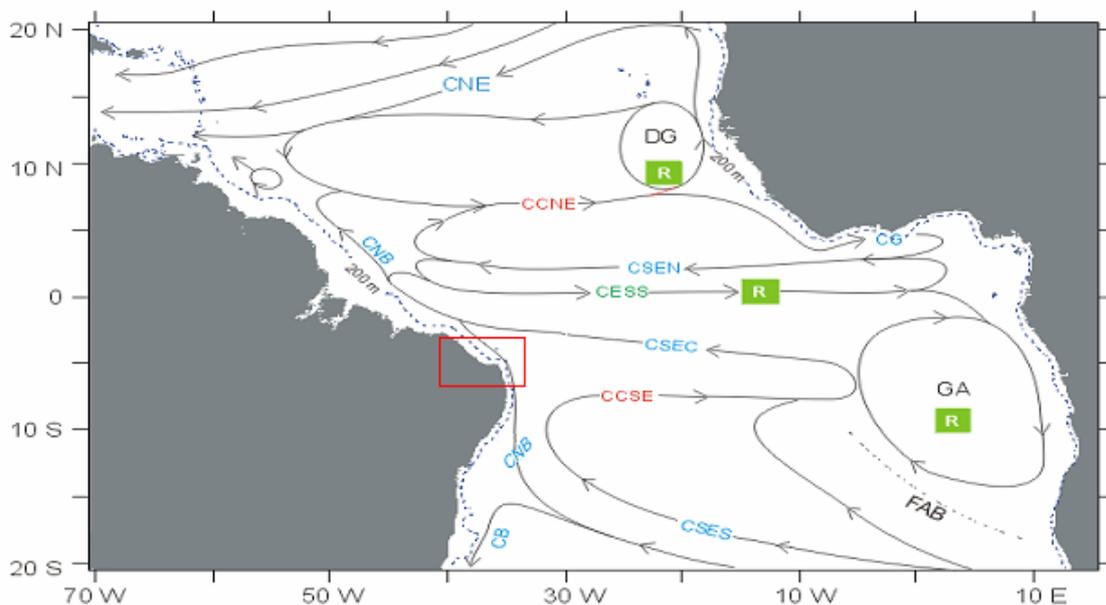


Figura II.5.1.2-1: Circulação superficial no Oceano Atlântico Equatorial destacando a Corrente Norte do Brasil (CNB) e a região de interesse localizada no retângulo vermelho. Fonte: adaptado de Stramma & Schott, 1999.

Controlando o regime de correntes na parte externa da plataforma Continental e no Talude, a CNB apresenta-se como um fluxo constante para noroeste com velocidade que pode alcançar 120 cm/s (Richardson (1994) *apud* PETROBRAS, 2002). Ainda segundo este relatório, a velocidade da CNB varia entre 25 e 200cm/s, dependendo de eventuais interações com ventos alísios e da posição relativa dentro dos limites da corrente. De acordo com Johns *et al.* (1998), a CNB apresenta um forte ciclo anual, com um máximo de transporte ocorrendo em Julho-Agosto (36 Sv¹) e mínimo em Abril-Maio (13 Sv).

Nos domínios internos da plataforma, a circulação é resultante da composição das correntes de maré e de deriva costeira, esta última decorrente da ação dos ventos locais. Como efeito da predominância de ventos do quadrante Leste (entre SE e NE) e da orientação E-O da linha de costa adjacente ao Campo de Siri, a corrente resultante tem direção paralela à costa, com fluxo preferencialmente para oeste. Tal fato é registrado por Signorini & Miranda (1983) que, em função da influência dos ventos alísios durante todo o ano, as correntes costeiras nas Bacias do Ceará e Potiguar apresentam forte componente para Oeste. Em relação às marés, os mesmos autores citam como principais componentes as constituintes harmônicas de variabilidades semidiurnas e diurnas que, somadas, contribuem com correntes da ordem de 20 cm/s na direção ortogonal à costa.

C) Caracterização de Parâmetros Oceanográficos

Para a região definida como área de influência das atividades no Campo de Siri, é apresentada neste item a caracterização dos seguintes parâmetros oceanográficos: temperatura, salinidade e densidade da água do mar, agrupados em propriedades físico-químicas e massas d'água; regime de marés; regime de correntes; e regime de ondas. Por fim, segue-se o estudo para a elaboração de cenários de refração de ondas na região.

Na caracterização das propriedades físico-químicas da água e do regime de correntes foi dada ênfase à utilização de dados primários oriundos do Programa

¹ Sv (Sverdrup): unidade de volume, representando 10⁶ m³.

de Monitoramento Ambiental da Bacia Potiguar. Este programa, implementado pela PETROBRAS a partir do ano de 2002, visa acompanhar os impactos ambientais decorrentes da atividade de descarte de efluentes no mar pelo emissário submarino do Pólo de Guamaré, Rio Grande do Norte, através da realização de levantamentos periódicos, observando metodologias e malhas amostrais semelhantes.

Outras fontes de informações utilizadas nesta descrição, além de literatura pertinente, consistiram de bases de dados públicas ou científicas, tais como: o Banco de Dados Oceanográficos da Marinha do Brasil (BNDO), para dados de observação visual de ondas; a do *Remote Sense Systems* (RMSS) para os dados de temperatura da superfície do mar do sensor remoto TMI (*TRMM Microwave Imager*); e do Serviço Hidrográfico e Oceanográfico da Marinha Francesa (SHOM), para dados de previsão de marés.

C.1) Propriedades Físico-Químicas e Massas d'água

Os dados utilizados nesta caracterização consistem de perfis verticais de temperatura e salinidade obtidos pelo lançamento de equipamento de aquisição contínua chamado de CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*), durante as campanhas de levantamento realizadas em maio (PETROBRAS 2004) e novembro de 2003 (PETROBRAS, 2005b). Considerando que estes levantamentos descreveram uma mesma malha amostral, ilustrada pela Figura II.5.1.2-2, os gráficos e análises apresentados referem-se aos dados provenientes das estações de coleta dispostas em 5 seções perpendiculares à costa, denominados Perfis 1, 2, 3, 4, 5 no mapa da Figura II.5.1.2-3, como forma de permitir comparação entre os diferentes períodos de levantamento.

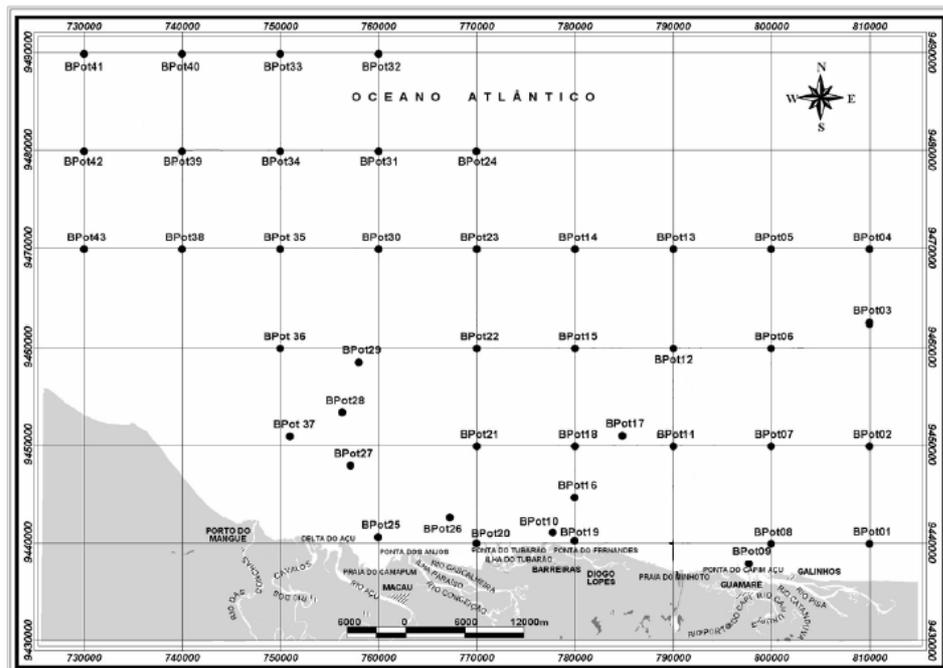


Figura II.5.1.2-2: Mapa esquemático da área de estudo, com a localização das estações da malha de caracterização ambiental da Bacia Potiguar. Fonte: adaptado de PETROBRAS, 2004 e 2005b.

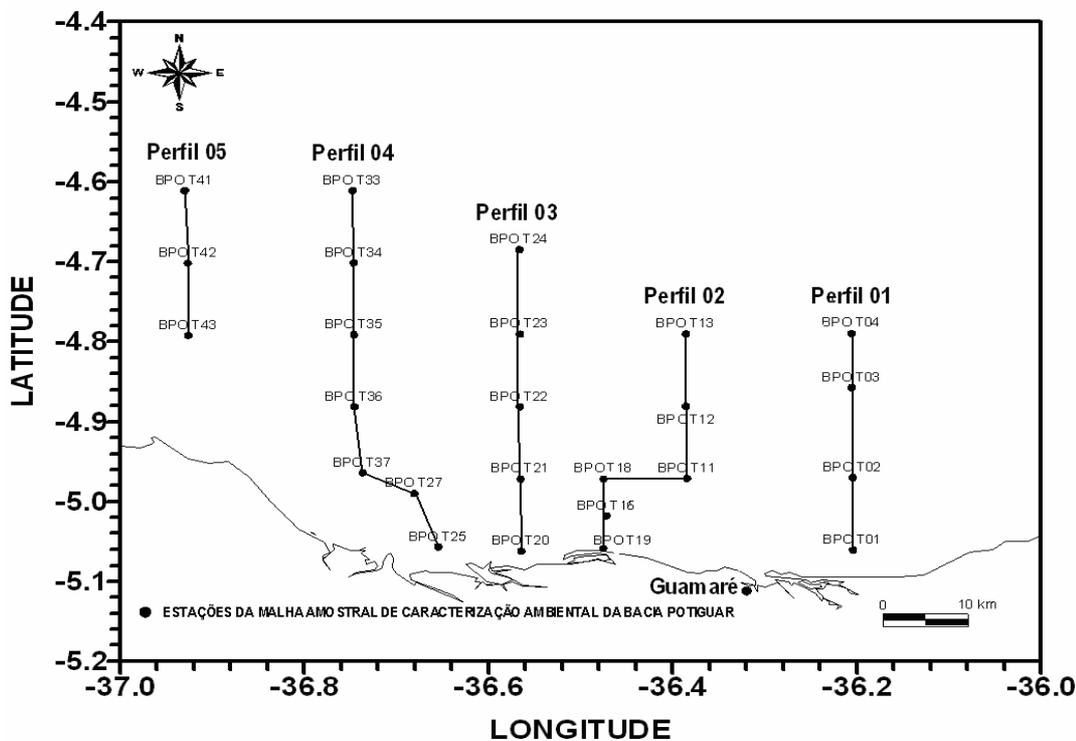


Figura II.5.1.2-3: Mapa de localização dos perfis com as respectivas estações oceanográficas. Fonte: adaptado de PETROBRAS, 2004 e 2005b.

Pelos diagramas TS, construídos a partir dos dados dos perfis amostrais considerados, nota-se que, enquanto em novembro (Figuras II.5.1.2-5) os pares de temperatura e salinidade concentraram-se dentro de uma estreita faixa (entre 27° e 28°C e 36 a 38 ups²), os perfis de maio (Figura II.5.1.2-4) apresentaram maior dispersão, com valores de temperatura da água entre 27,3° e 29,3° C (concentração de pares em torno de 28,5°C) e salinidade entre 35 e 37,5 ups (concentração em 36 ups). Como efeito, percebe-se pelas linhas indicativas do parâmetro sigma-t, menores valores de densidade da água durante o levantamento de maio.

Em termos de análise de massas d'água, a Água Tropical (AT), caracterizada por valores de temperatura em torno de 27° C e altos valores de salinidade, acima de 36 ups (Stramma & Schott, 1999), esteve presente na coluna d'água de todas as estações amostradas, entre a superfície e a profundidade de 70 metros, sendo a massa d'água dominante da região do Campo de Siri e de toda sua área de influência. Já a Água Central do Atlântico Sul (ACAS), caracterizada por relação TS quase linear, com intervalo de temperatura entre 8° e 18°C e de salinidade entre 34,5 e 36 ups (Sverdrup *et al.*, 1942) foi percebida em apenas algumas poucas estações, em níveis inferiores à profundidade de 70 metros.

No tocante à distribuição vertical das propriedades físico-químicas, constatou-se a existência de uma coluna d'água praticamente homogênea na grande maioria dos perfis amostrados, em ambas as campanhas de monitoramento. As variações, quando existentes, estiveram limitadas aos primeiros metros da coluna d'água, evidenciando a resposta típica do oceano à ação de forçantes meteorológicas na interface oceano-atmosfera, tais como: precipitação, radiação solar e cisalhamento eólico. Nas estações mais profundas (tais como BPot04, BPot05, BPot32, BPot33 e BPot40), verificou-se uma diferença significativa entre os valores de temperatura na superfície e no fundo, caracterizando diferentes ambientes termohalinos.

² Ups: Unidade Prática de Salinidade, sendo a tradução do inglês *Practical Salinity Unit (psu)*.

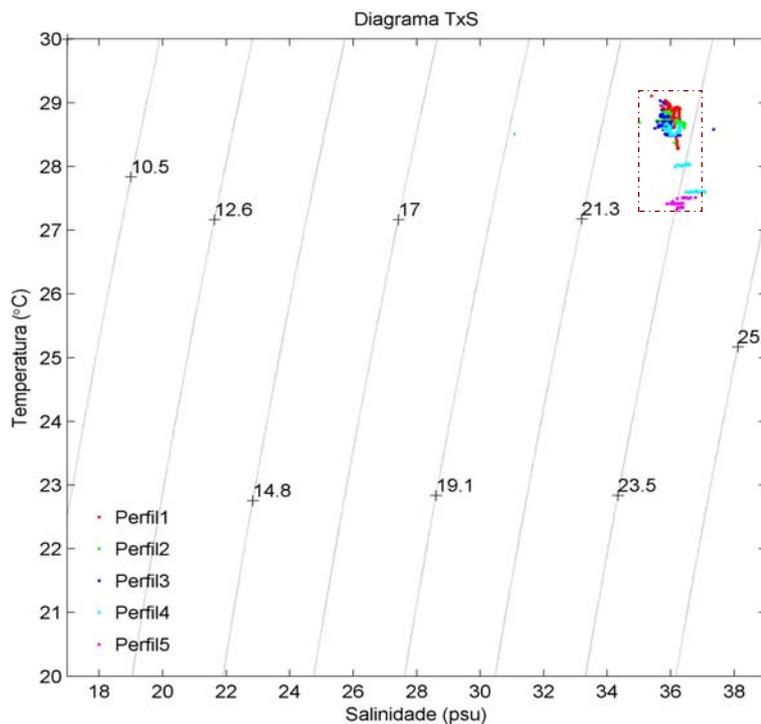


Figura II.5.1.2-4: Diagrama TS para os dados de CTD da campanha de maio de 2003. Retângulo

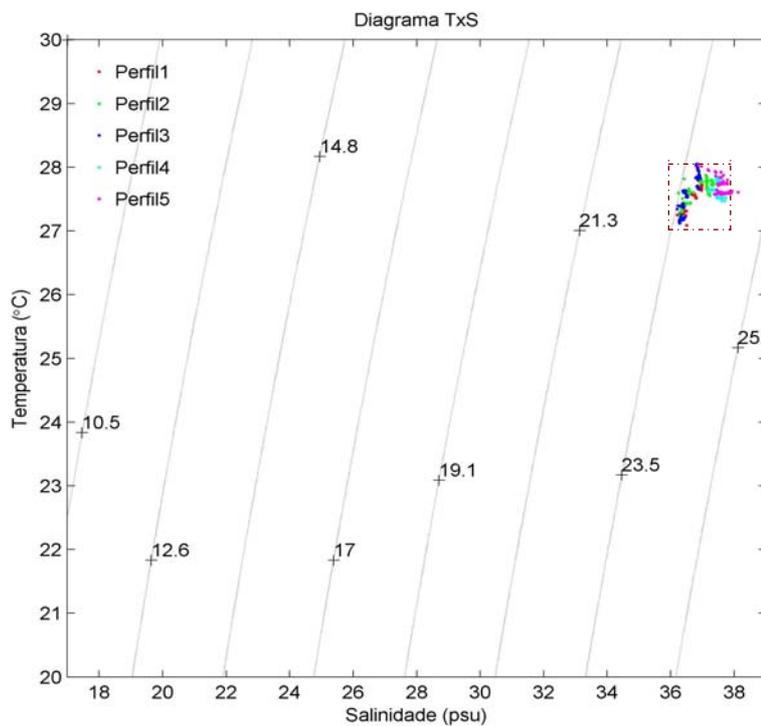


Figura II.5.1.2-5: Diagrama TS para os dados de CTD da campanha de novembro de 2003. Retângulo tracejado indica faixa de dispersão.

Reforçando a análise espacial, a construção de seções verticais das propriedades para cada perfil descrito - como as ilustradas pela Figura II.5.1.2-22, no item anexo ao final desta seção, para os dados obtidos na campanha de novembro de 2003 - revelou que a homogeneidade ao longo da coluna d'água ocorre primordialmente sobre a região da Plataforma Continental, indicando intenso processo de mistura induzido pela dinâmica local. Apenas nas seções que cobrem áreas de Plataforma Externa e Talude Continental (Perfis 1 e 4) é verificada a estratificação das propriedades nos níveis mais profundos, a partir da borda da plataforma, como reflexo da estrutura termohalina local.

As seções verticais revelaram, no entanto, existência de significativos gradientes horizontais, com maiores valores de temperatura e salinidade nas regiões mais próximas à costa. Conforme mencionado anteriormente, tal fato decorre da influência dos agentes meteorológicos locais, cujos efeitos em regiões mais rasas tendem a ser mais evidentes.

Os valores de temperatura superficial na área de estudo apresentaram-se com uma amplitude térmica de 1,8° C em maio (mínima de 27,2° C, e máxima de 29,0° C) com uma média de cerca de 28,1° C. Em novembro, a amplitude situou-se em 0,8° C (mínima de 27,2° C, e máxima de 28,0° C), com média de 27,6° C. Quanto à distribuição superficial da salinidade, esta apresentou valor médio de 36,2 ups em maio (mínimo de 35,7 ups e máximo de 36,9 ups), e de 37,1 ups em novembro (mínimo de 36,2 ups e máximo de 37,8 ups). Em todos os perfis a máxima salinidade foi registrada a partir da profundidade de 2 metros, sobretudo nas regiões mais próximas da costa.

Em respeito à densidade da água, propriedade dependente das demais, a distribuição vertical e horizontal acompanha o comportamento da salinidade. Valores superficiais do parâmetro sigma-t³ apresentaram uma média de 23,32 kg/m³, (máximo de 24,08 kg/m³ e mínimo 22,71 kg/m³) em maio e 24,06 kg/m³ em novembro (máximo de 24,66 kg/m³ e mínimo 23,59 kg/m³).

Enquanto que as propriedades físico-químicas são distribuídas ao longo da coluna d'água por ação de forçantes hidrodinâmicas e meteorológicas locais, com flutuações associadas a pequenas escalas de tempo e espaço, o modo de

³ Sigma-t: $\sigma_t = \rho - 1000 \text{ kg.m}^{-3}$, onde ρ é a densidade da água.

variabilidade sazonal dominante na costa norte brasileira ocorre em função de fenômenos de larga escala na bacia do Oceano Atlântico Tropical.

Esta afirmação é demonstrada através da análise estatística dos dados de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) obtidos pelo sensor remoto TMI (*TRMM Microwave Imager*), a bordo do satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*). Como ilustrado pela Figura II.5.1.2-23, ao final desta seção, as cartas de valores médios mensais de TSM - construídas para o período de observação de janeiro de 1998 e dezembro de 2002, em grade de resolução de 0,125° x 0,125° sobre o Atlântico Tropical - evidenciam o comportamento sazonal deste parâmetro, já referido neste texto como Padrão Dipolo do Atlântico, pelo qual as máximas temperaturas superficiais ocorrem alternadamente entre as bacias sul e norte deste oceano.

Em concordância com este comportamento, a evolução do campo de TSM ao longo do ano sobre a área de influência do Campo de Siri, indicada pelo polígono nas cartas da Figura II.5.1.2-23 e destacada pelas cartas da Figura II.5.1.2-24, revelou temperaturas máximas nos meses de março a maio, e mínimas entre agosto e outubro. Considerando ainda que as máximas de TSM estão bem relacionados com máximos de precipitação devido ao posicionamento da ZCIT na costa norte da Região Nordeste Brasileira, conforme descrito em Meteorologia (Item II.5.1.1), pode-se inferir em uma variabilidade inversa para distribuição da salinidade superficial do mar e, conseqüentemente, do campo de densidade. Em outras palavras, menores valores de salinidade e densidade ocorreriam durante o período chuvoso, de TSM máximas, e os maiores valores durante a estação seca, de mínima TSM.

Como demonstra a Tabela II.5.1.2.1, que oferece uma base comparativa entre os valores médios superficiais dos parâmetros medidos *in situ* com a evolução da TSM do ponto da grade mais próximo ao Campo de Siri, a correlação descrita acima é claramente identificada. Em termos absolutos, nota-se forte concordância entre os valores de temperatura superficial dos dados medidos nas campanhas de campo com os derivados da climatologia de TSM.

Tabela II.5.1.2-1: Valores médios mensais de TSM para a região do Campo de Siri e valores médios superficiais das propriedades conforme observado nas campanhas de levantamento de maio e novembro de 2003.

MÊS	Dados TMI	Propriedades Observadas		
	TSM (°C)	Temperatura média (° C)	Salinidade média (ups)	Sigma-t médio (kg/m ³)
Janeiro	28,11	n.d.	n.d.	n.d.
Fevereiro	28,53	n.d.	n.d.	n.d.
Março	28,65	n.d.	n.d.	n.d.
Abril	28,95	n.d.	n.d.	n.d.
Maio	28,77	28,1	36,2	23,32
Junho	28,26	n.d.	n.d.	n.d.
Julho	27,57	n.d.	n.d.	n.d.
Agosto	27,15	n.d.	n.d.	n.d.
Setembro	27,09	n.d.	n.d.	n.d.
Outubro	27,21	n.d.	n.d.	n.d.
Novembro	27,54	27,6	37,1	24,06
Dezembro	27,72	n.d.	n.d.	n.d.

n.d.: Não disponível.

C.2) Regime de Maré

No Oceânico Atlântico Equatorial são predominantes as chamadas marés semi-diurnas, onde se registram dois eventos de preamar (pico de maré alta) e dois de baixa-mar (pico de maré baixa) a cada dia lunar (de cerca de 24,8 horas). Nestas latitudes, segundo Beardsley *et al.* (1995), as componentes harmônicas dominantes são: a lunar principal (M2), de período de 12,4 horas, a solar principal (S2), de 12,0 horas, e a lunar-elíptica maior (N2), com período de 12,6 horas.

Como resultado das elevadas amplitudes apresentadas por estas componentes, observam-se significativas correntes de maré junto à costa (Signorini & Miranda, 1983). Tal característica será demonstrada pela análise do comportamento dinâmico na região em estudo, onde as correntes de maré predominam na circulação sobre a Plataforma Continental até junto ao litoral.

A caracterização do regime de maré baseou-se essencialmente nas análises dos registros das estações maregráficas de Areia Branca e Macau, no Estado do Rio Grande do Norte, apresentadas no Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras (Salles *et al.*, 2000) e resumidas pelas Tabelas II.5.1.2-2 e II.5.1.2-3.

A estatística dos registros (Tabela II.5.1.2-2) revela amplitudes máximas, entre médias de preamares e baixa-mares de sizígia, de 306 cm em Areia Branca e 248 cm em Macau, e amplitudes mínimas, em quadratura, de 228 cm e 185 cm, respectivamente. A variação notada entre as localidades é atribuída aos diferentes valores de amplitude das componentes harmônicas, como revela a Tabela II.5.1.2-3, em seguida, onde os 4 principais harmônicos dos distintos regimes de maré são listados. Tais regimes são visualizados através dos maregramas apresentados pela Figura II.5.1.2-6, os quais foram construídos com base em dados simulados a partir dos principais componentes.

Tabela II.5.1.2-2: Características da maré em Areia Branca e Macau
(Adaptado de Salles *et al.*, 2000).

	AREIA BRANCA	MACAU
Latitude	04°49,5'S	05°06,2'S
Longitude	37°02,4'W	36°36,1'W
Nível Médio	188 cm	154 cm
Média das Preamares de Sizígia	340 cm	278 cm
Média das Preamares de Quadratura	264 cm	215 cm
Média das Baixa-Mares de Sizígia	36 cm	30 cm
Média das Baixa-Mares de Quadratura	111 cm	93 cm

Tabela II.5.1.2-3: Semi-amplitude (H) e fase (G) das principais componentes da maré em Areia Branca e Macau (Adaptado de Salles et al., 2000)

Componentes harmônicos		AREIA BRANCA		MACAU	
		H (cm)	G (graus)	H (cm)	G (graus)
M2	Lunar Principal	114,2	127	92,6	133
S2	Solar Principal	37,7	147	31,6	136
N2	Lunar-elíptica Maior	25,4	113	21,0	147
K2	Lunar-solar Declinacional	10,3	148	8,6	136

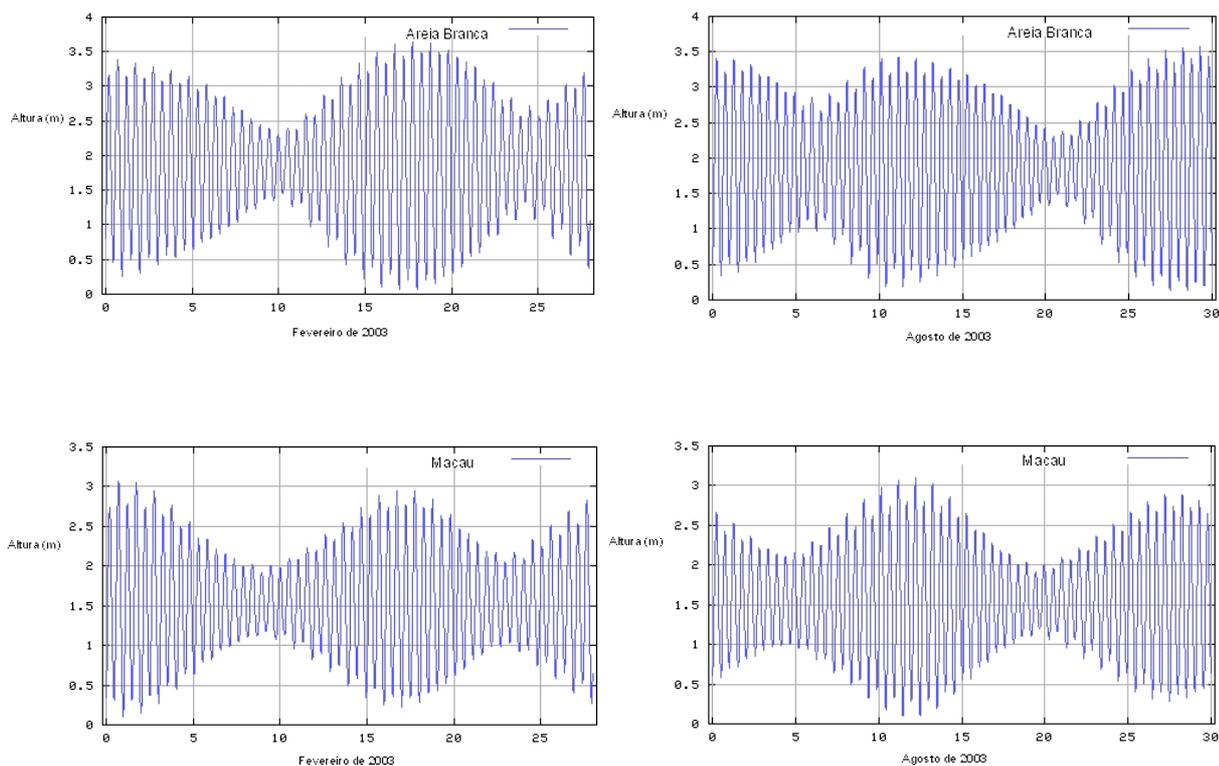


Figura II.5.1.2-6: Maregramas simulados para Areia Branca (acima) e Macau (abaixo), considerando fevereiro (esquerda) e agosto (direita) de 2003. Adaptado de SHOM (2003).

C.3) Regime de Correntes

Para a caracterização do comportamento dinâmico na área de influência do Campo de Siri, foram analisadas séries de dados horários de intensidade e direção de corrente oriundos de fundeios de perfiladores de corrente; Fundeio 1 (PETROBRAS & Oceansat, 2003) , Fundeio 2 (Devon & Oceansat, 2001) e Fundeio 3 (PETROBRAS, 2005a), detalhados na Tabela II.5.1.2-4, e de fundeios de correntômetros realizados durante as campanhas de monitoramento ambiental na Bacia Potiguar (PETROBRAS, 2004 e 2005b), detalhados na Tabela II.5.1.2-5.

Como indicado na Carta de Correntes da Figura II.5.1.2-25, em anexo, enquanto as séries de correntômetros descrevem a circulação oceânica de regiões sob influência direta do campo (Fundeios 5, 6 e 7) e ao largo deste (Fundeio 4), os dados dos perfiladores fornecem informações sobre o regime em seções distintas da plataforma ao longo da área de influência indireta.

Tabela II.5.1.2-4: Detalhes dos fundeios dos perfiladores de correntes

	FUNDEIO 1	FUNDEIO 2	FUNDEIO 3
Posição Geográfica	04°52'00"S 37°09'01"W	04°26'29"S 37°19'03"W	04°19'34"S 37°15'36"W
Profundidade Local	6 metros	17 metros	29 metros
Níveis de Medição	11 camadas de 0,5 metro	32 camadas de 0,5 metro	58 camadas de 0,5 metro
Período de Aquisição	21 a 27/04/2001	22/09 a 02/12/2000	24/09/2000 a 24/09/2001

Tabela II.5.1.2-5: Detalhes dos fundeios de correntômetros.

	FUNDEIO 4	FUNDEIO 5	FUNDEIO 6	FUNDEIO 7
Posição Geográfica	04° 51,9' S 036° 22,4' W	05°04'16,7"S 036°22'51,9"W	05°03'11,2"S 036°22'29,9"W	05°01'20,0"S 036°25'55,5"W
Profundidade Local	20 metros	8 metros	6 metros	9 metros
Profundidade de Medição	2 metros	6 metros	5 metros	~ 5metros
Período de Aquisição	04/05 a 03/06/2002	19 a 23/05/2003	14 a 19/05/2003	13 a 30/05/2003

A análise das séries de dados registrados pelos perfiladores indicou que os maiores percentuais de variância recaem no período semi-diurno (~12 horas), indicando a predominância das correntes de maré nos registros. Enquanto que no Fundeio 2 esta variância está acima de 90%, no Fundeio 3, em região de plataforma externa, este valor está em torno de 75%. Nestas três localidades os altos valores de variância descritos pela componente semi-diurna, em todos os níveis de profundidade amostrados, revelam pouca variabilidade das correntes de maré entre a superfície e o fundo da coluna d'água (Vianna & Menezes, 2003).

A homogeneidade vertical é evidenciada ainda através da análise de ocorrência das observações segundo intervalos de intensidade e direção, como revelam as Tabelas II.5.1.2-9 a II.5.1.2-14, no item anexo ao final desta seção. Construídas para os dados obtidos no Fundeio 3, de maior período de amostragem, para os níveis de 2, 5, 10, 15, 20 e 25 metros de profundidade, estas tabelas revelam uma ocorrência superior a 50% de correntes entre 5 e 15 cm/s, e acima de 30% para a faixa de direção de 270-310°, em todas os níveis. A classe individual com maior frequência relativa em todas as distribuições foi a de 10-15cm/s entre 270-280° (~2,5%). Tal distribuição é ilustrada pelos histogramas direcionais apresentados pela Figura II.5.1.2-7, construídos com base nas referidas tabelas.

A análise também revela valores de intensidade ligeiramente maiores nos níveis intermediários da coluna d'água, corroborando a dominância de forçantes de mais larga escala (como a maré e a CNB), na dinâmica local. Variabilidades sazonais significativas não foram observadas nas séries anuais do Fundeio 3, embora tenha sido verificada a presença de sinais com variabilidades nas faixas de períodos de 8-12 dias, 18 dias e 170 dias (Vianna & Menezes, 2003).

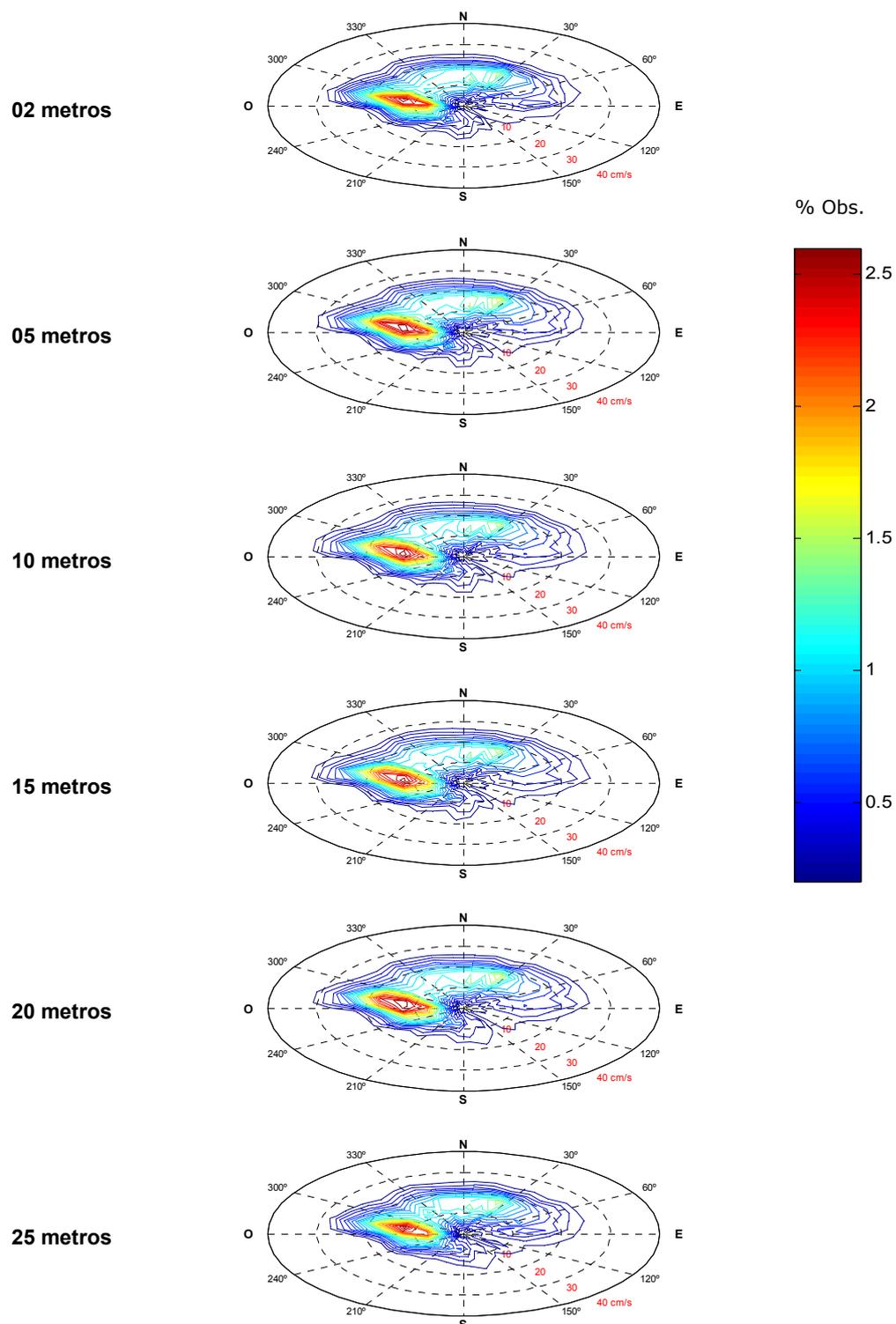


Figura II.5.1.2-7: Histogramas direcionais das séries de corrente do Fundeio 3, nas profundidades indicadas. As escalas de cores indicam faixas de frequência em relação ao número total de observações de cada série, em %. A intensidade de corrente é representada pelos círculos tracejados concêntricos, com valores indicados em vermelho, em cm/s.

De forma permitir a comparação dos regimes de correntes nas diferentes regiões dos fundeios de perfiladores, a Figura II.5.1.2-8 destaca os diagramas direcionais referentes ao nível superficial de cada uma das posições (2 metros de profundidade no Fundeio 1, 3 metros no Fundeio 2 e 4 metros no Fundeio 3), elaborados a partir das respectivas tabelas de ocorrência apresentadas no final desta seção (Tabelas.5.1.2-15 a 5.1.2-17).

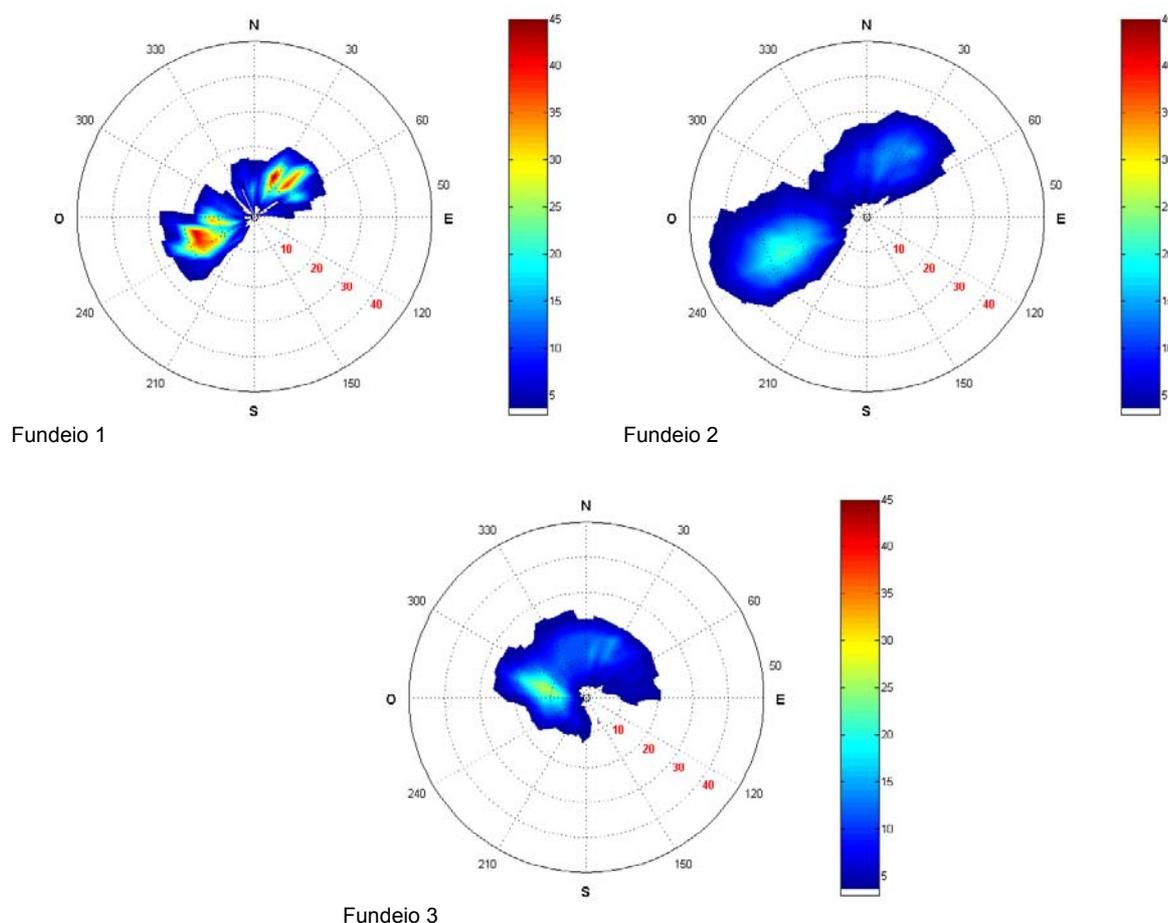


Figura II.5.1.2-8: Histogramas direcionais das séries de corrente superficial registradas pelos perfiladores nos Fundeios 1, 2 e 3. As escalas de cores indicam faixas de freqüência em relação ao número total de observações de cada série, em ‰ (por mil).

A série registrada pelo Fundeio 1 evidencia um claro domínio do sinal bipolar de maré, semi-diurno, com predominância de correntes com intensidade média entre 15 e 20 cm/s durante o período de enchente e entre 10 e 15 cm/s na vazante. O mesmo padrão é observado no Fundeio 2, onde a assimetria das correntes de maré é melhor discriminada, com máximo em torno de 40 cm/s na enchente e de 30 cm/s na vazante. Percebe-se ainda um desvio para oeste do eixo de oscilação da maré decorrente da influência de componente zonal constante, representando as correntes geradas pelos ventos locais. A análise dos registros identificou a predominância de um fluxo médio de 8 cm/s na direção NW e máximo em torno de 15 cm/s.

No Fundeio 3, o padrão bipolar associado a regiões de plataforma interna e média é parcialmente desfeito pela influência de uma componente zonal mais significativa, de magnitude equivalente às correntes de maré. Com 29% das observações entre 10 e 15 cm/s, tal componente está associada a maior influência da CNB sobre a quebra da plataforma. Os valores de intensidade das correntes de enchente e vazante têm máximos em 23cm/s e 26 cm/s, respectivamente, e a deriva máxima em 30 cm/s.

No tocante às observações realizadas pelos correntômetros fundeados na região mais próxima ao Campo de Siri (Fundeios 4, 5, 6, e 7), a Figura II.5.1.2-9 apresenta os histogramas direcionais construídos a partir da análise de ocorrência das respectivas séries. O histograma referente ao Fundeio 4 evidencia predominância do sinal bipolar nos registros de correntes, com valores de intensidade similares à série de dados superficiais do Fundeio 2. Os registros revelam significativa assimetria entre as correntes de enchente e de vazante, com máximos em torno de 40 cm/s e 35 cm/s, respectivamente, e um desvio do eixo de oscilação, indicando a ação de uma corrente de deriva de componente zonal. De acordo com os dados, esta deriva desenvolveu fluxo constante médio de 10 cm/s para 280°, com máximo em 20 cm/s nesta direção.

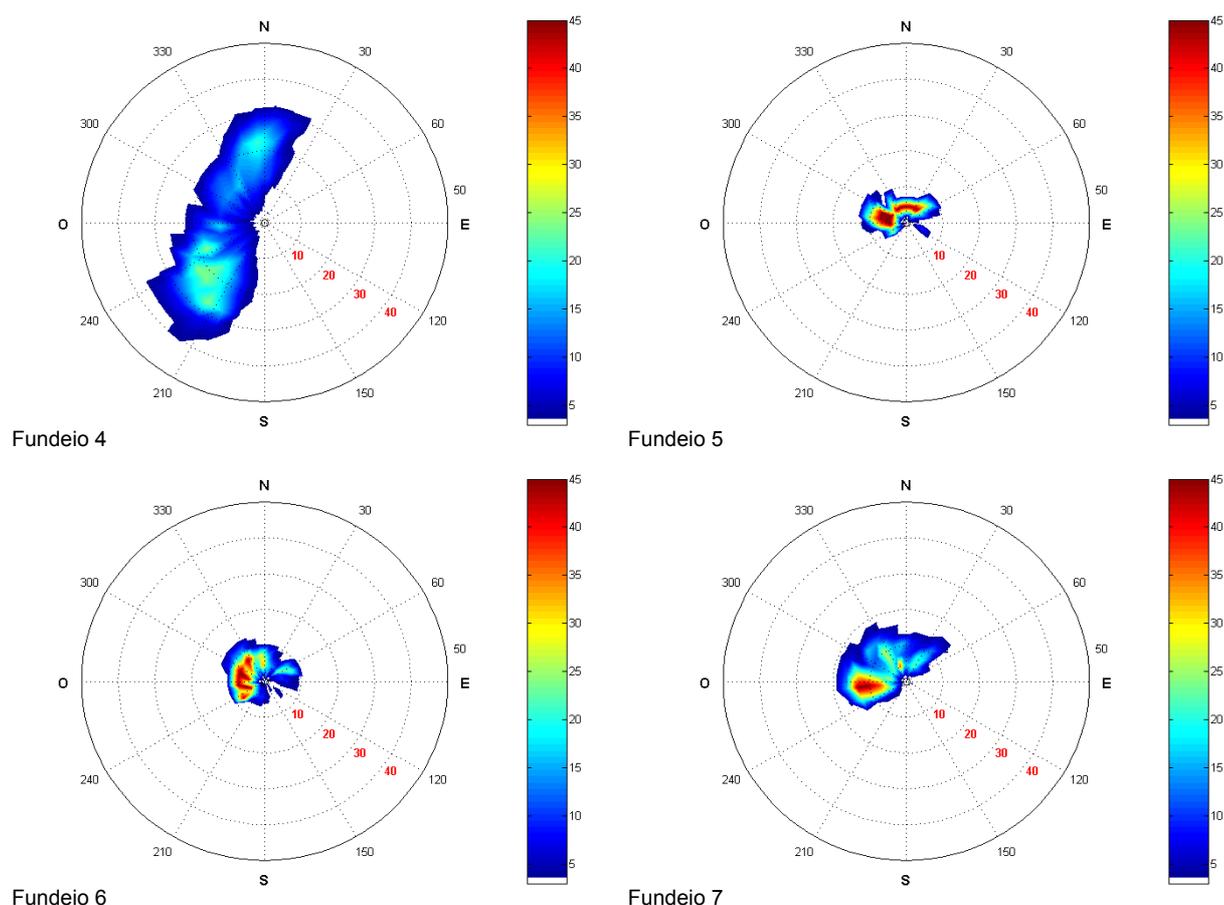


Figura II.5.1.2-9: Histogramas direcionais das séries de correntes registradas pelos correntômetros nos fundeios 4, 5, 6 e 7. As escalas de cores indicam faixas de freqüência em relação ao número total de observações de cada série, em ‰ (por mil).

A análise conjunta dos registros de correntes do Fundeio 4 com a oscilação do nível do mar para a localidade costeira de Macau, simulada para as componentes principais semi-diurnas, é ilustrada pela Figura II.5.1.2-10, e evidencia a dominância da forçante astronômica sobre a circulação nesta porção média da Plataforma Continental. A série de dados deste Fundeio foi utilizada na calibração do Modelo Hidrodinâmico para região compreendida entre as Bacias do Ceará e Potiguar, conforme discutido na seção II.5.1.4 - Modelagem da Dispersão de Óleo e Efluentes, deste relatório.

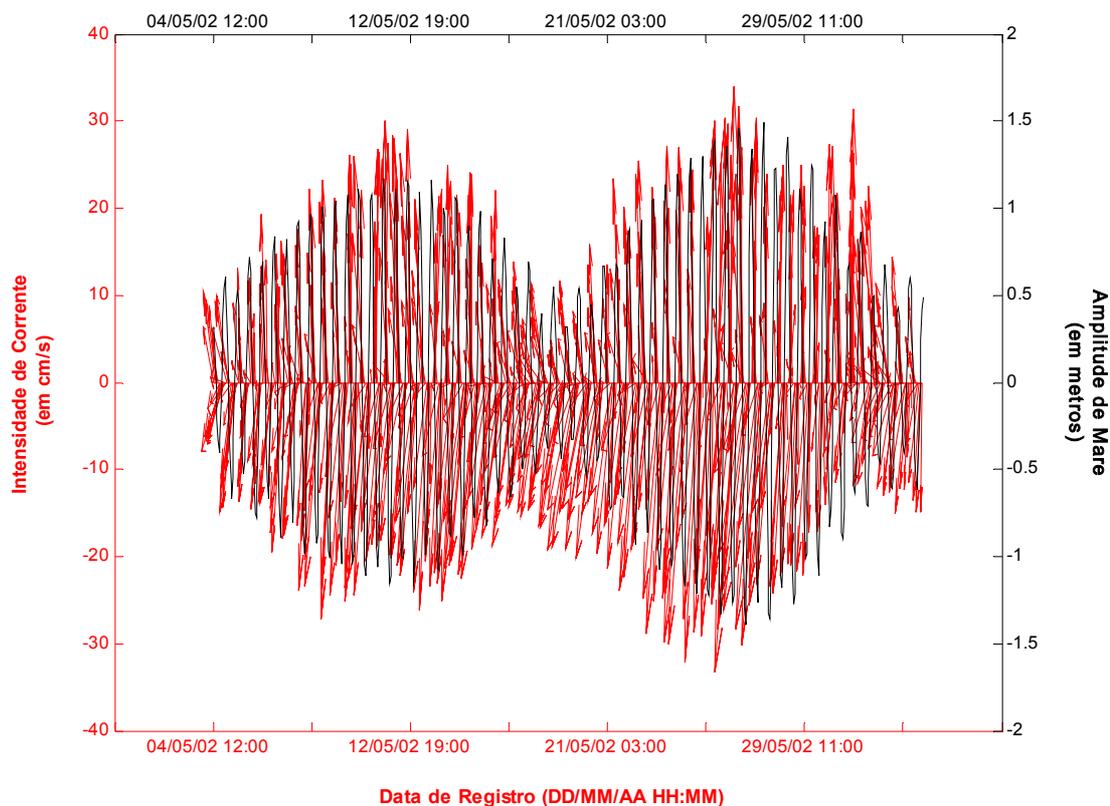


Figura II.5.1.2-10: Representação da série temporal de correntes do Fundeio 4, em vermelho e elevação da superfície para a localidade de Macau, em preto, no período de 04/05 a 03/06/2002.

Nos diagramas dos Fundeios 5, 6 e 7, segundo a Figura II.5.1.2-9, há predominância de fluxo médio zonal, com intensidades não ultrapassando 20 cm/s na região do campo, e até 15 cm/s nos pontos mais próximos à costa. A representação destes registros ao longo do período de amostragem (maio de 2003), pela Figura II.5.1.2-11, contra uma série simulada de elevação do nível do mar para a localidade costeira de Macau, adjacente ao Campo de Siri, revela também forte influência do regime de marés na região. A equivalência de fase nos sinais é exemplificada pela Figura II.5.1.2-12, onde o gráfico apresenta a sobreposição de dois dias de registros semi-horários dos Fundeios 5 e 7.

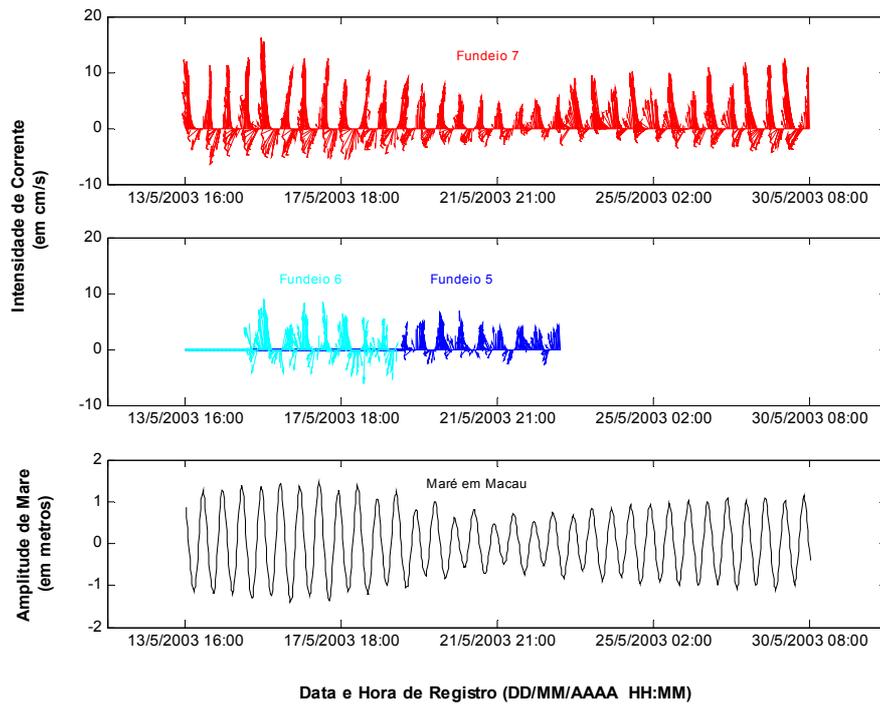


Figura II.5.1.2-11: Representação das séries de correntes dos Fundeios 7 (vermelho), 5 (azul) e 6 (azul claro), e da elevação da superfície para Macau, no período de 04/05 a 03/06/2002.

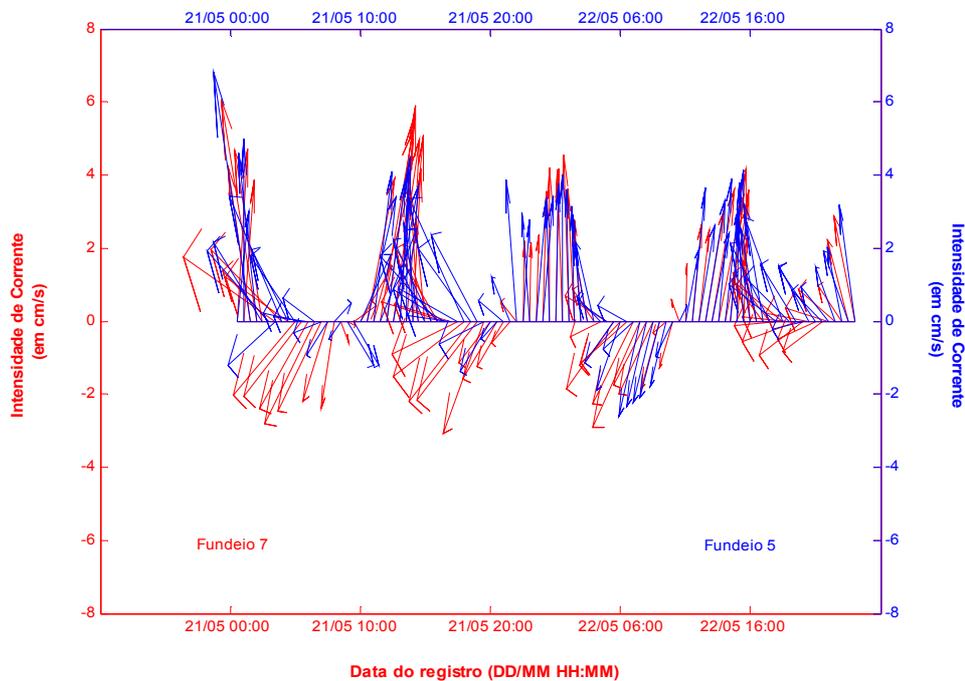


Figura II.5.1.2-12: Representação das observações de correntes dos Fundeios 5 (em azul) e 7 (em vermelho), para os dias 21/05 a 23/06/2002.

Com base nas análises apresentadas, distinguem-se três regimes de correntes distintos sobre área de influência do Campo de Siri, os quais podem ser associados a padrões dentro dos limites da Plataforma Continental na região, a saber: Plataforma Média, Interna e Externa. A Tabela II.5.1.2-6 sintetiza o comportamento hidrodinâmico em cada seção segundo valores médios e extremos das componentes de corrente de maré e de deriva. Visando ainda permitir a percepção espacial de tais informações, um Mapa de Correntes da região é apresentado ao final desta seção, pela Figura II.5.1.2-25, onde as componentes são individualizadas e dimensionadas para cada região descrita.

Tabela II.5.1.2-6: Condições médias e extremas das componentes de corrente para as distintas seções da Plataforma Continental da Bacia Potiguar (valores em cm/s).

COMPONENTE	PLATAFORMA INTERNA		PLATAFORMA MÉDIA		PLATAFORMA EXTERNA	
	MÉDIA	EXTREMA	MÉDIA	EXTREMA	MÉDIA	EXTREMA
Maré	5-10	15-20	15-20	35-40	10-15	25-30
Deriva	10	20	10	20	15	30

C.4) Regime de Ondas

O regime de ondas no litoral norte do Brasil, considerando a região entre os Estados do Amapá e Rio Grande do Norte, é controlado pelos ventos alísios, apresentando alturas em torno de 1 a 1,5 metro em mar aberto e direção predominantemente de leste, oscilando entre NE e SE (Innocentini *et al.*, 2000).

Além da agitação gerada localmente (vagas), deve-se considerar ainda a incidência de marulhos na faixa de períodos acima de 10 segundos, com duração de alguns dias, causados por furacões extra-tropicais no Atlântico Norte. A freqüência de ocorrência destes furacões é bastante variável de ano para ano, mas a maioria ocorre entre agosto e outubro, com pico em setembro (Vianna, 2000; Innocentini *et al.*, 2000).

Dados primários de ondas próximos à área de interesse foram obtidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias ao largo da localidade de Pecém, Estado do Ceará, nas coordenadas 03° 30' 46" S e 038° 48' 54" W, por um ondógrafo direcional posicionado sobre a isóbata de 17 metros (INPH, 1999). A análise ora apresentada refere-se ao tratamento estatístico e espectral de 7468 registros de altura e período de onda, obtidos entre março de 1997 e janeiro de 1999. Ressalta-se que, mesmo que referente a uma região fora da área de influência do Campo de Siri, a descrição do regime de ondas em Pecém é válida para os objetivos deste estudo, visto a similaridade do campo de forçantes meteorológicas no litoral norte do Brasil, conforme já mencionado.

Em termos de alturas máximas observadas, a Figura II.5.1.2-13 apresenta a distribuição em intervalos de classe de altura, segundo a frequência relativa de ocorrência. Este histograma revela que as ondas máximas entre 1,6 e 2,8 metros de altura corresponderam a mais de 70% dos registros, sendo que a classe mais frequente foi a de 2,0-2,1 metros, com 6,75%. Ondas com mais de 4 metros contribuem com menos de 0,22% dos registros.

Segundo o histograma de Altura Significativa de Onda (Hs), parâmetro derivado da análise no domínio da frequência, também apresentado pela Figura II.5.1.2-13, aproximadamente metade das observações recaem na faixa de valores entre 1 e 2 metros, com ocorrência de valores até 2,5 metros, embora com frequência relativa muito pequena, em torno de 0,04%.

Histograma de H_{máx}- Março/97 a Janeiro/99

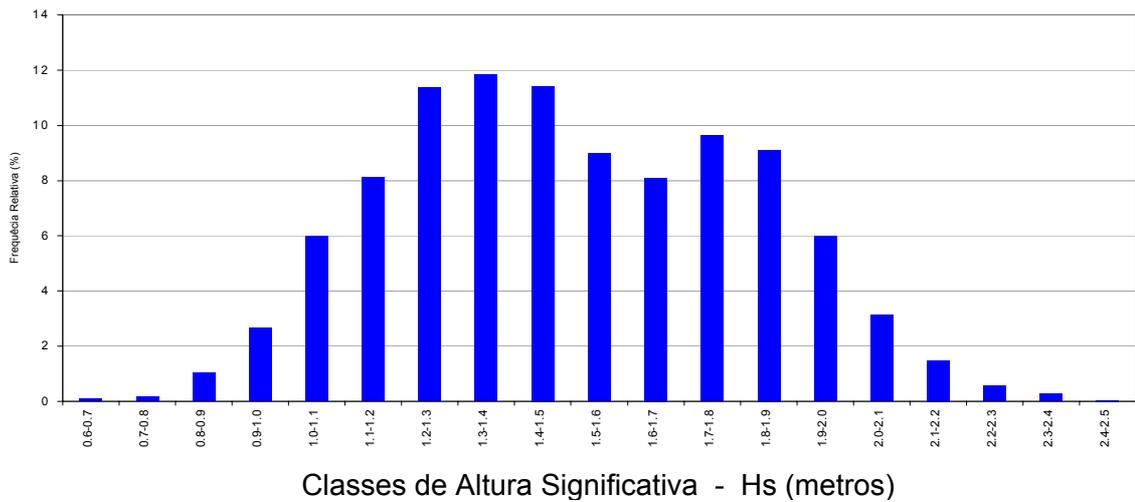
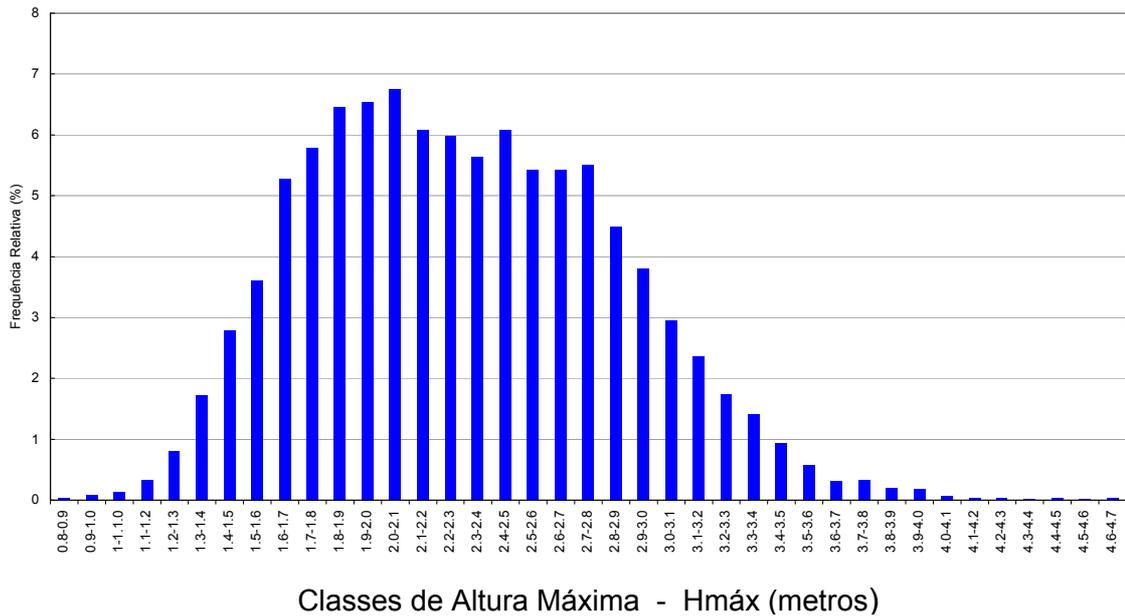


Figura II.5.1.2-13: Histogramas de Altura Máxima Observada (gráfico acima) e de Altura Significativa (gráfico de baixo).

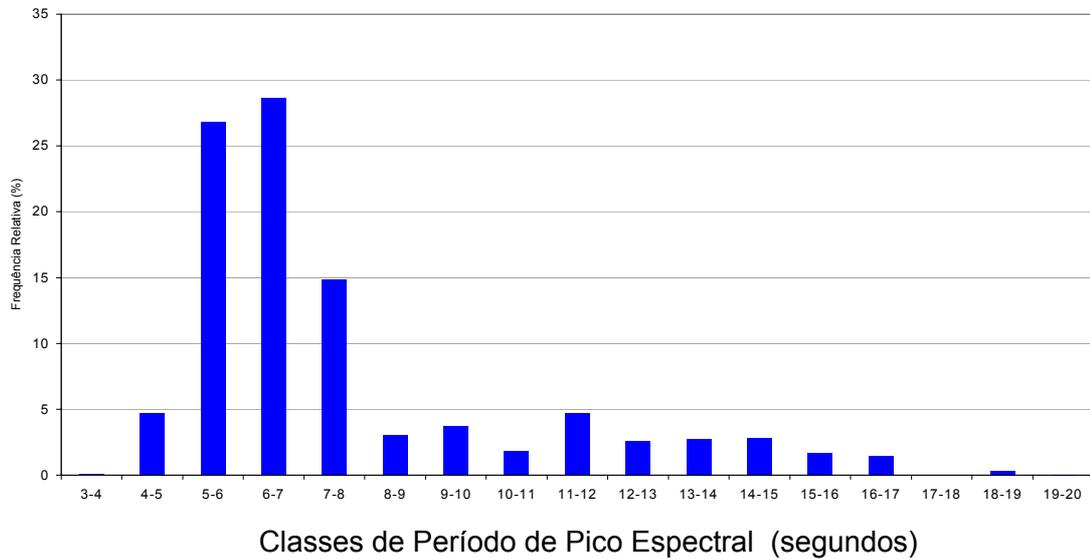
O histograma de Período de Pico (Figura II.5.1.3-14) mostra a predominância de ondas nas faixas entre 5 e 8 segundos, com mais de 70% dos registros, ainda que períodos mais longos (de até 20 segundos) apresentem ocorrência significativa (aproximadamente 25%). O histograma de Direção Média no Pico do Espectro (Figura II.5.1.3-14) é bi-modal, revelando maiores ocorrências na classe de direção de 30°-60° (NE) e de 90°-120° (ESE).

A regressão entre as classes de altura significativa e período de pico é apresentada pela Tabela II.5.1.2-7, e ilustrada pela Figura II.5.1.2-15, onde a ocorrência conjugada das faixas de período e altura significativa predominantes (1 a 2 metros e entre 5 e 8 segundos, respectivamente) correspondem a 2/3 (66,6%) da distribuição. A maior ocorrência individual (11,93%) foi descrita pela faixa de 5-6 segundos no intervalo de 1,25-1,50 metros de altura significativa.

As ondas individuais máximas foram registradas dentro da classe de Hs entre 2-2,3 metros, de período de pico espectral entre 6-7 segundos e direção entre 90°-110°. Já a maior altura significativa registrada, de 2,48 metros, correspondeu à faixa de período de onda de 7-8 segundos e apresentou direção 90°-110°.

Para a região inserida nos limites entre 4°S a 6°30'S e 34°W a 37°W, compreendendo a área de influência da atividade, foram analisados dados de medições visuais de altura e período de ondas feitas a partir de navios de oportunidade, armazenados pelo BNDO como dados *ship*. A validade destas informações, apesar das limitações e imprecisões inerentes do método, está no grande volume de dados e extenso período observação (entre 1963 e 1996).

Os histogramas mensais construídos para estes dados, apresentados pelas Figuras II.5.1.2-16, II.5.1.2-17 e II.5.1.2-18, revelam predomínio de ondas individuais com altura entre 1 e 1,5 m ao longo de todo o ano, com frequência próxima a 60%, e direção entre E e SE. A partir de abril, e até setembro, por força da intensificação dos ventos alísios de sudeste, esta direção passa a predominar nas observações, juntamente com um progressivo aumento da frequência relativa do intervalo de 2-2,5 metros de altura. Neste período são ainda registradas as maiores alturas de onda, principalmente em setembro, quando a frequência de alturas acima de 4 metros atingiu seu máximo: a 4%.



Histograma de D- Março/97 a Janeiro/99

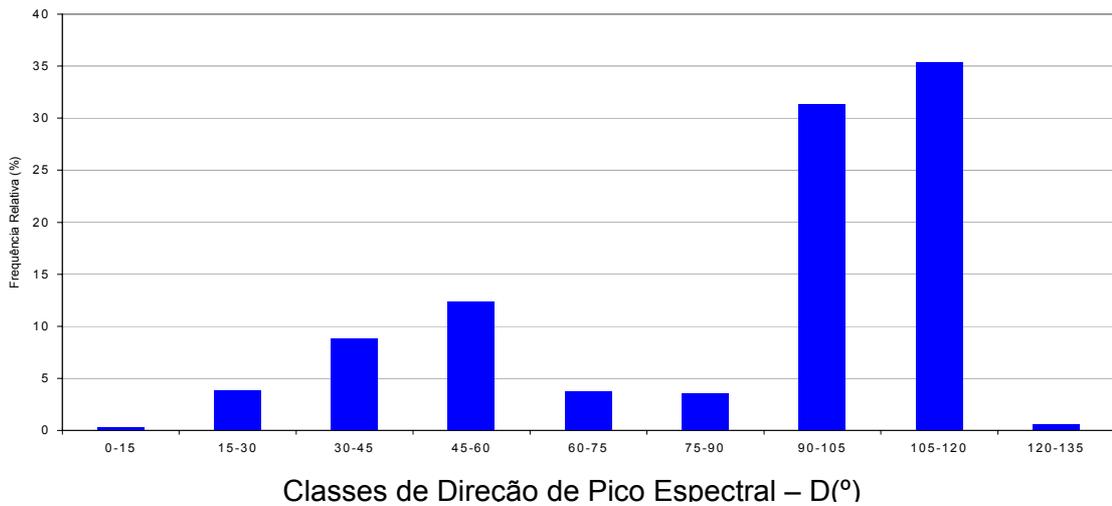


Figura II.5.1.2-14: Histogramas de Período de Pico Espectral (gráfico acima) e de Direção Média no Pico do Espectro (gráfico de baixo).

Tabela II.5.1.2-7: Regressão entre Altura Significativa (Hmo) e Período de Pico (Tp) para os dados de Pecém, CE (- significa 0,00)

Tp (s) \ Hmo (m)	Hmo (m)										Total (%)
	0,0 – 0,25	0,25 – 0,5	0,5 – 0,75	0,75 – 1,0	1,0 – 1,25	1,25 – 1,50	1,50 – 1,75	1,75 – 2,0	2,0 – 2,25	2,25 – 2,50	
0-1	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,03
1-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00
2-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00
3-4	-	-	-	-	0,01	-	-	-	-	-	0,01
4-5	-	-	-	0,27	1,25	0,6	0,08	0,02	-	-	2,22
5-6	0,03	-	0,01	0,70	6,57	11,93	6,67	3,20	0,25	0,03	29,39
6-7	0,04	-	-	0,27	1,67	6,24	9,20	9,47	1,58	0,11	28,58
7-8	0,01	-	-	0,70	2,01	2,21	2,87	4,62	2,04	0,39	14,85
8-9	-	-	0,01	0,40	1,23	1,10	0,16	0,05	0,05	0,02	3,02
9-10	-	-	-	0,25	0,76	0,51	0,21	0,03	-	-	1,76
10-11	-	0,03	0,01	0,21	1,11	1,04	0,48	0,72	0,12	0,01	3,73
11-12	-	-	0,05	0,35	1,47	0,94	0,59	1,06	0,21	-	4,67
12-13	-	-	0,05	0,19	0,94	0,91	0,24	0,21	0,03	-	2,57
13-14	-	-	0,03	0,27	0,94	0,98	0,31	0,15	0,07	-	2,75
14-15	0,01	-	0,01	0,12	0,91	1,10	0,44	0,15	0,09	0,01	2,84
>15	-	-	-	0,05	0,75	1,47	0,50	0,33	0,47	0,01	3,58
Total (%)	0,12	0,03	0,17	3,78	19,62	29,03	21,75	20,01	4,91	0,58	100,00

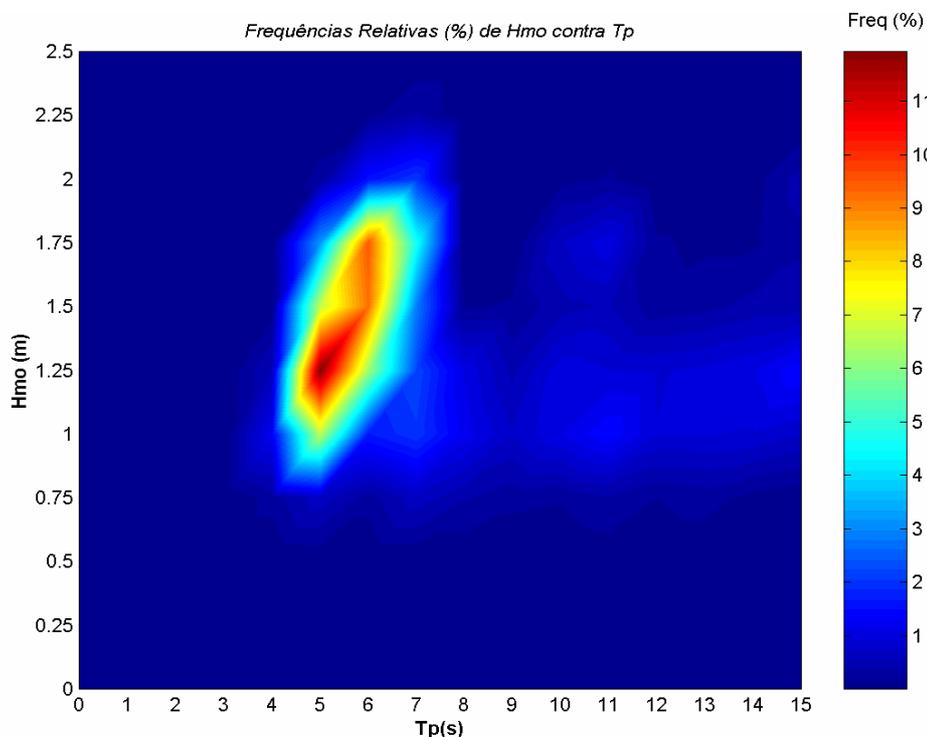


Figura II.5.1.2-15: Representação gráfica para a regressão entre Altura Significativa (Hmo) e Período de Pico (Tp).

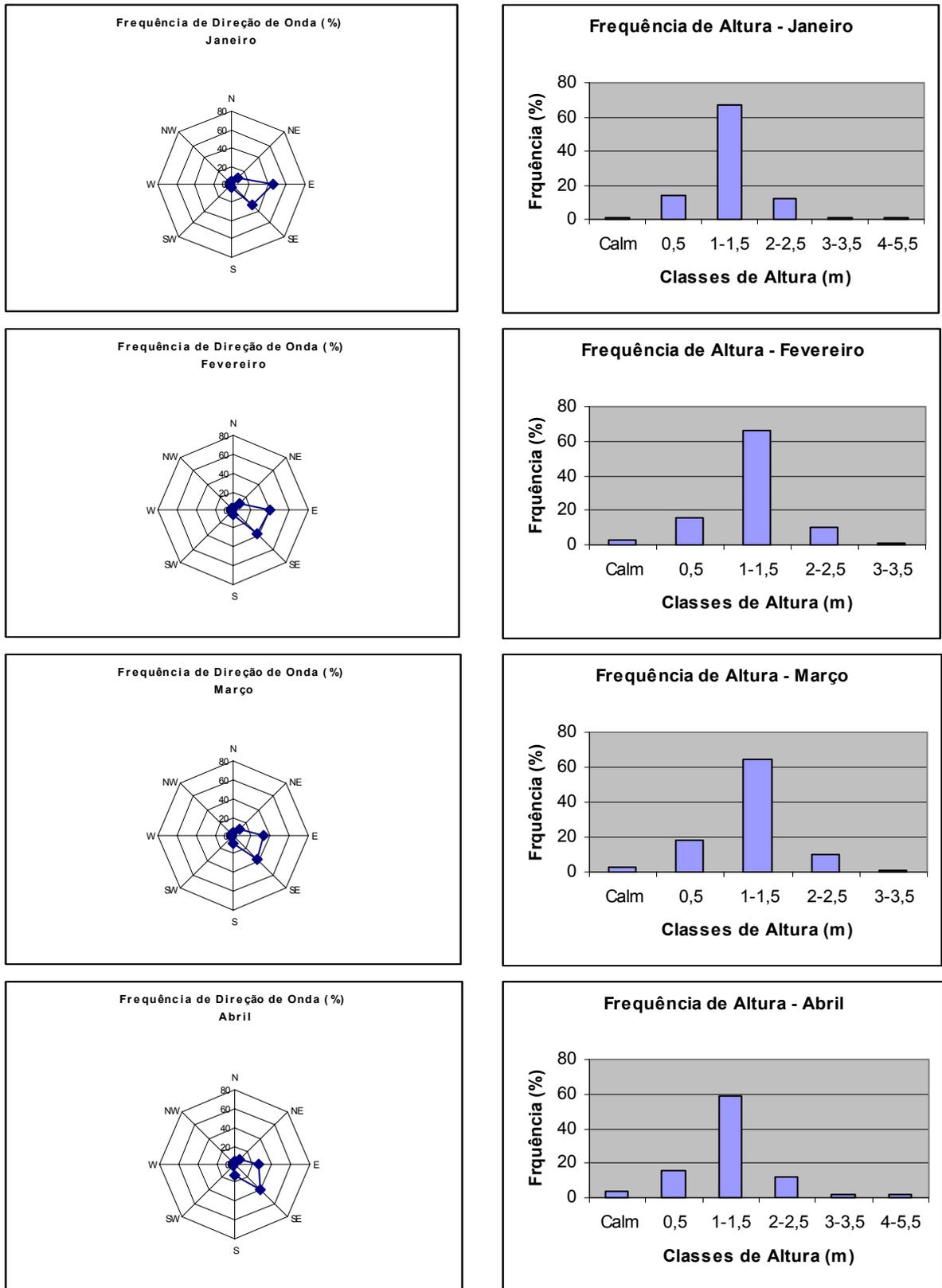


Figura II.5.1.2-16: *Frequência de direção e altura de onda para os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro da série de 1963 a 1996.*

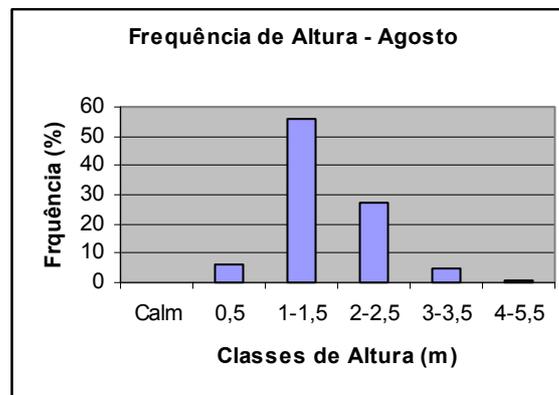
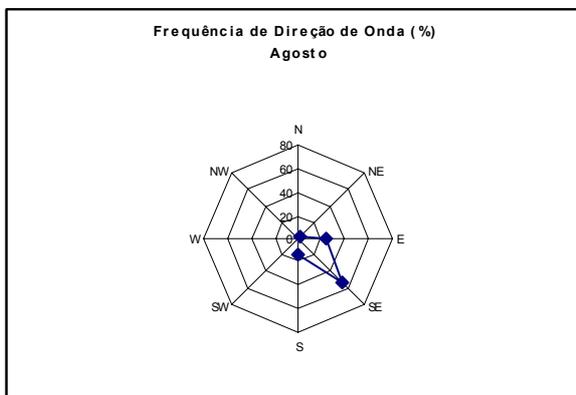
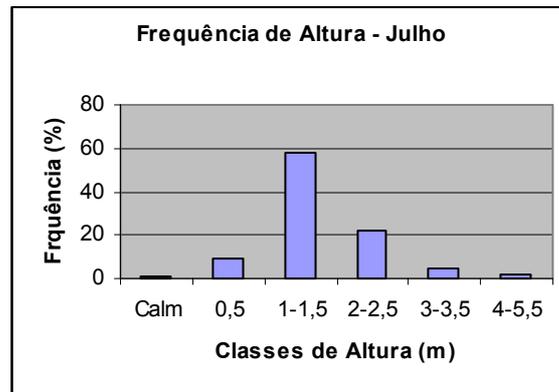
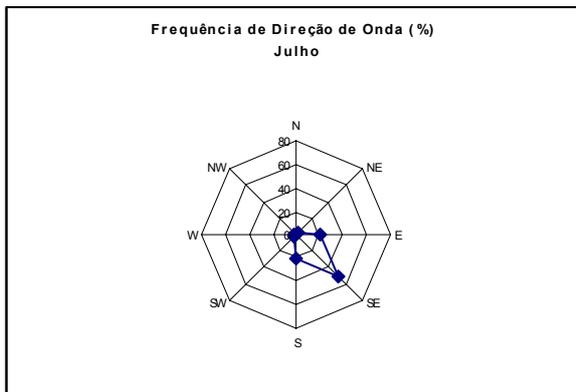
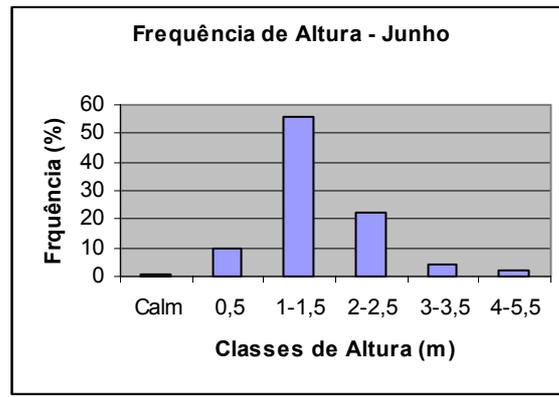
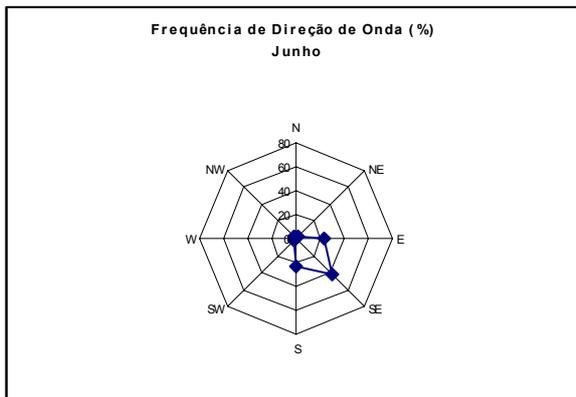
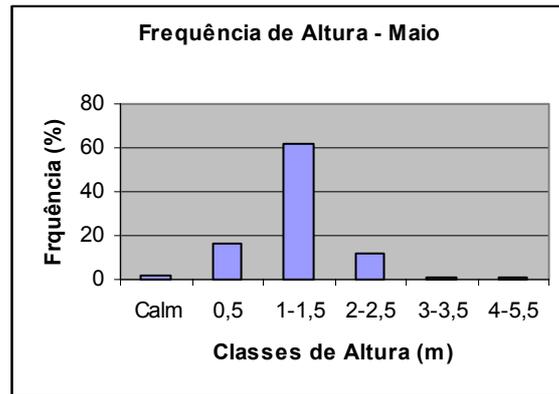
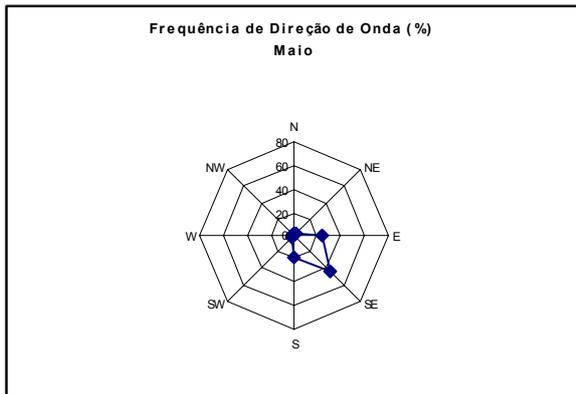


Figura II.5.1.2-17: *Frequência de direção e altura de onda para os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro da série de 1963 a 1996.*

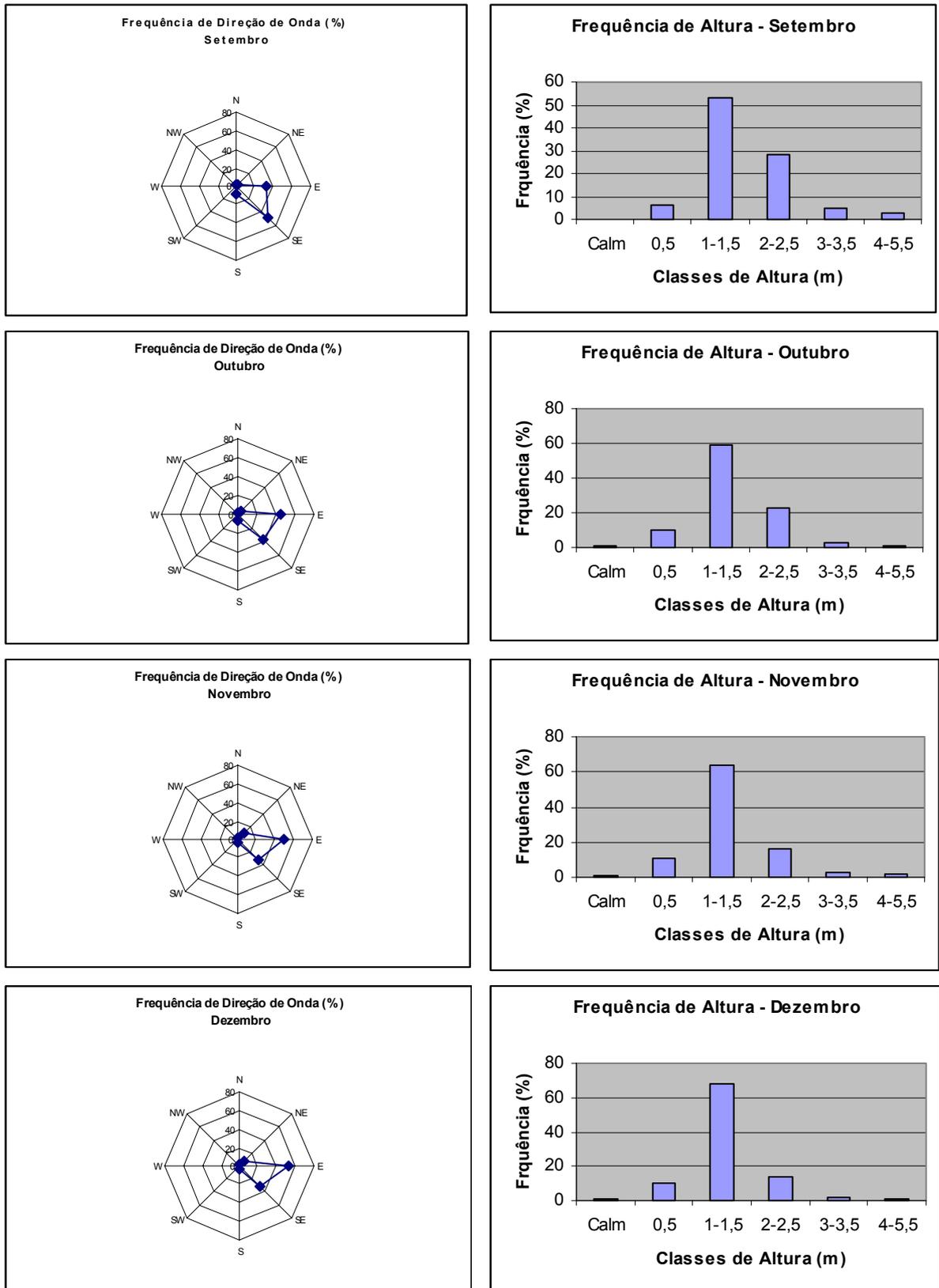


Figura II.5.1.2-18: *Frequência de direção e altura de onda para os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro da série de 1963 a 1996.*

C.5) Mapa de Refração de Ondas

O fenômeno de refração das ondas do mar consiste na mudança da direção de incidência, ao longo de sua crista, em relação às águas rasas, causada pela fricção com o fundo oceânico e a conseqüente redução da velocidade de propagação (celeridade). Como resultado desta deflexão, haverá tendência da crista de onda convergir nos locais rasos, onde houve perda de celeridade, e divergir com aumento da profundidade (CERC, 1984).

Representando a incidência de uma onda monocromática, com conhecidas características iniciais de altura, período e direção, o mapa de refração de ondas destina-se unicamente a descrever sua trajetória sobre região costeira e, assim, permitir identificar os pontos de maior fragilidade da costa frente à energia incidente.

Os mapas de refração apresentados neste estudo consistem nas saídas gráficas de simulações matemáticas realizadas no modelo SWAN (*Simulating Waves Nearshore*), o qual também considera dissipações de energia por interações com o fundo, como fricção, percolação e retro-espalhamento (Holthuijsen, 2000). Nos mapas, a refração das ondas por efeito do fundo é visualizada graças à sobreposição das isolinhas batimétricas, pela mudança dos vetores de direção e da altura da onda ao incidir em direção à costa.

Compreendendo a área de influência do Campo de Siri, a região modelada foi definida entre os limites 036,2° e 037° Oeste e 04,6° e 05,1° Sul. Os dados de batimetria utilizados nas simulações foram retirados da carta náutica de número 700 e do Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP, 2005), os quais foram interpolados para uma grade 334 colunas e 312 linhas (104.208 pontos) com resolução de 499,46 metros, representando uma malha de 1° de longitude para 0,6° de latitude.

Com base nas informações do regime de ondas apresentadas ao longo deste texto, foram elaborados três cenários de ondas incidentes de forma a abranger distintas condições de estado de mar descritas para a região. Assim, pela Tabela II.5.1.2-8, são apresentados os parâmetros de altura, período e direção das ondas representativas de cada cenário, a saber:

- Predominante: mar local (vagas) com ondas de sudeste de 1,5 metro de altura, ocorrendo ao longo de todo o ano;
- Médio: vagas de sudeste com valores de altura de 3 metros, com maior período, entre julho e dezembro;
- Extremo: representado por marulhos de 4 metros de altura oriundos do Atlântico Norte, conforme as referências citadas, de longo período, ocorrendo também na segunda metade do ano.

Tabela II.5.1.2-8: Cenários de estado do mar e respectivos parâmetros de onda utilizados nas simulações dos mapas de refração.

CENÁRIO		ÉPOCA DO ANO	ALTURA	PERÍODO	DIREÇÃO
01	Predominante	Jan-Dez	1,5 m	6 s	100°
02	Médio	Ago-Dez	3,0 m	8 s	120°
03	Extremo	Ago-Dez	4,0 m	20 s	30°

Os parâmetros de cada cenário são introduzidos no modelo matemático como condição inicial de excitação nas bordas do domínio da área modelada. Vale ressaltar que o modelo utilizado não contempla a interação de ondas com o campo de ventos locais. Assim, para os cenários de vagas, assume-se que as ondas introduzidas sejam oriundas da área de geração de ondas imediatamente adjacente ao domínio e que não haja desenvolvimento do mar durante as simulações. No caso dos marulhos de nordeste, tendo em vista a indisponibilidade de informações a respeito do regime de ondas em águas profundas, foi assumida uma onda monocromática inicial, de direção 30°, com valores extremos de altura e período, registrados pelo ondógrafo de Pecém.

O mapa de refração elaborado para o primeiro cenário (Figura II.5.1.2-19), representativo de condição predominante, revela a incidência na região do Campo de Siri de ondas de nordeste, com alturas inferiores a 0,5 metro. No cenário 02 (Figura II.5.1.2-20), representativo uma situação média, a direção de incidência continua de nordeste e as alturas no Campo de Siri chegam a mais de 0,5 metro. O terceiro mapa de refração gerado (Figura II.5.1.2-21), representando a incidência de marulhos de nordeste, resultou em alturas de 1,5 metro a 2,0 metros no Campo de Siri e com direções de incidência de norte-nordeste.

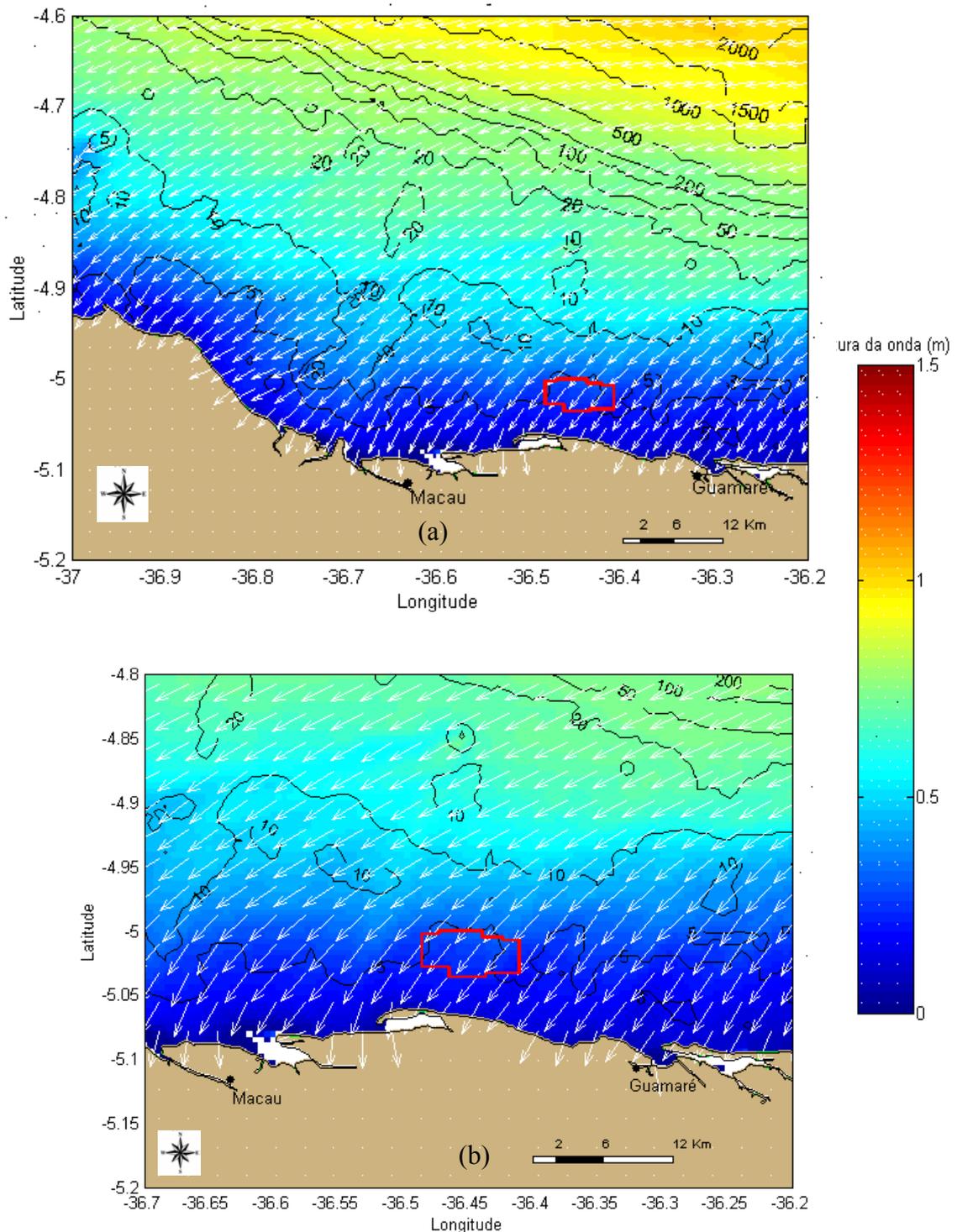


Figura II.5.1.2-19: Mapa de refração de onda gerado a partir do cenário 01 (a). O polígono em vermelho representa o domínio do Campo de Siri e a incidência das ondas em sua vizinhança está em destaque abaixo (b). A legenda de cores determina a mudança de altura da onda em metros. As isolinhas batimétricas estão representadas em preto e com os valores discriminados em metros.

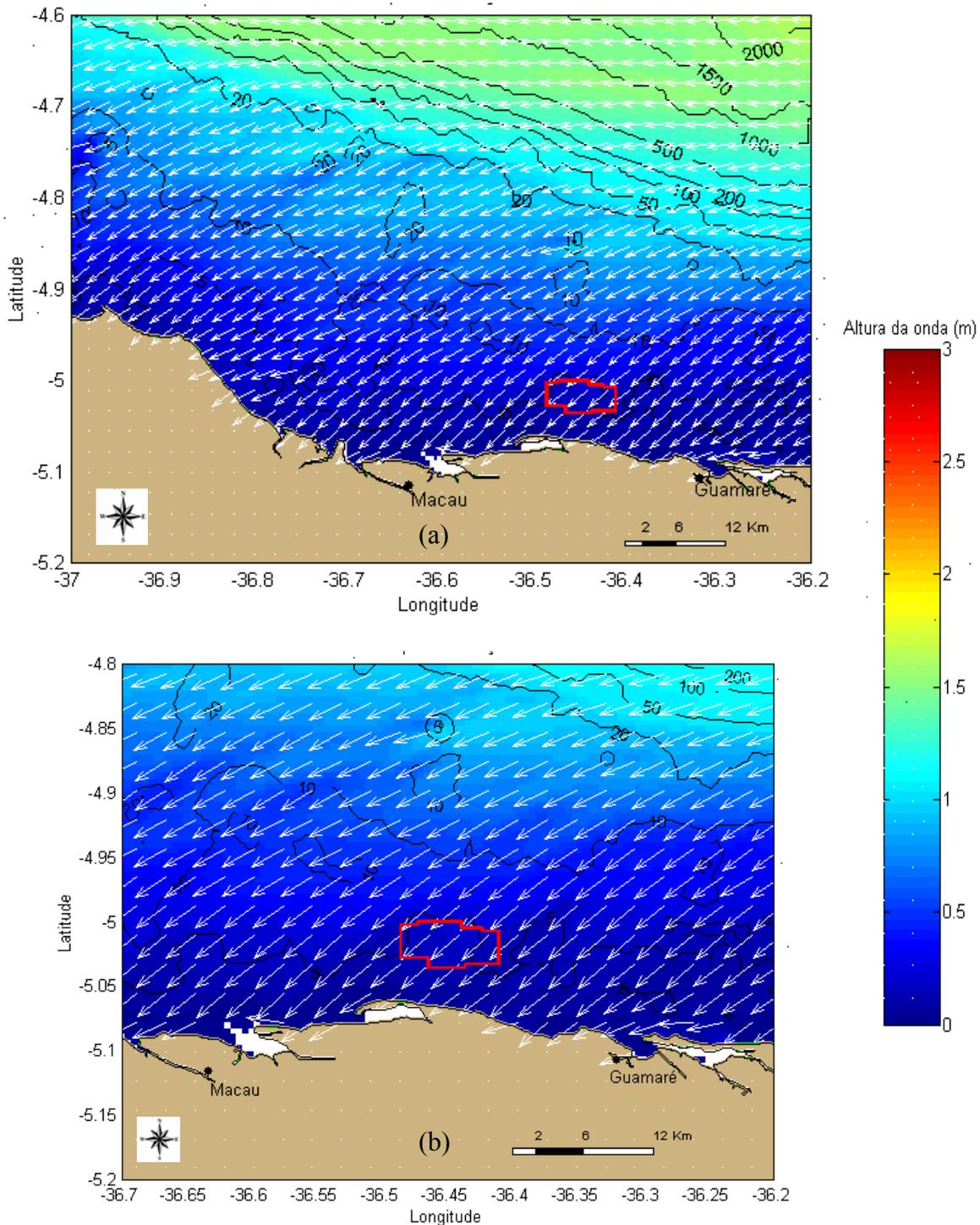


Figura II.5.1.2-20: Mapa de refração de onda gerado a partir do cenário 02 (a). O polígono em vermelho representa o domínio do Campo de Siri e a incidência das ondas em sua vizinhança está em destaque abaixo (b). A legenda de cores determina a mudança de altura da onda em metros. As isolinhas batimétricas estão representadas em preto e com os valores discriminados em metros.

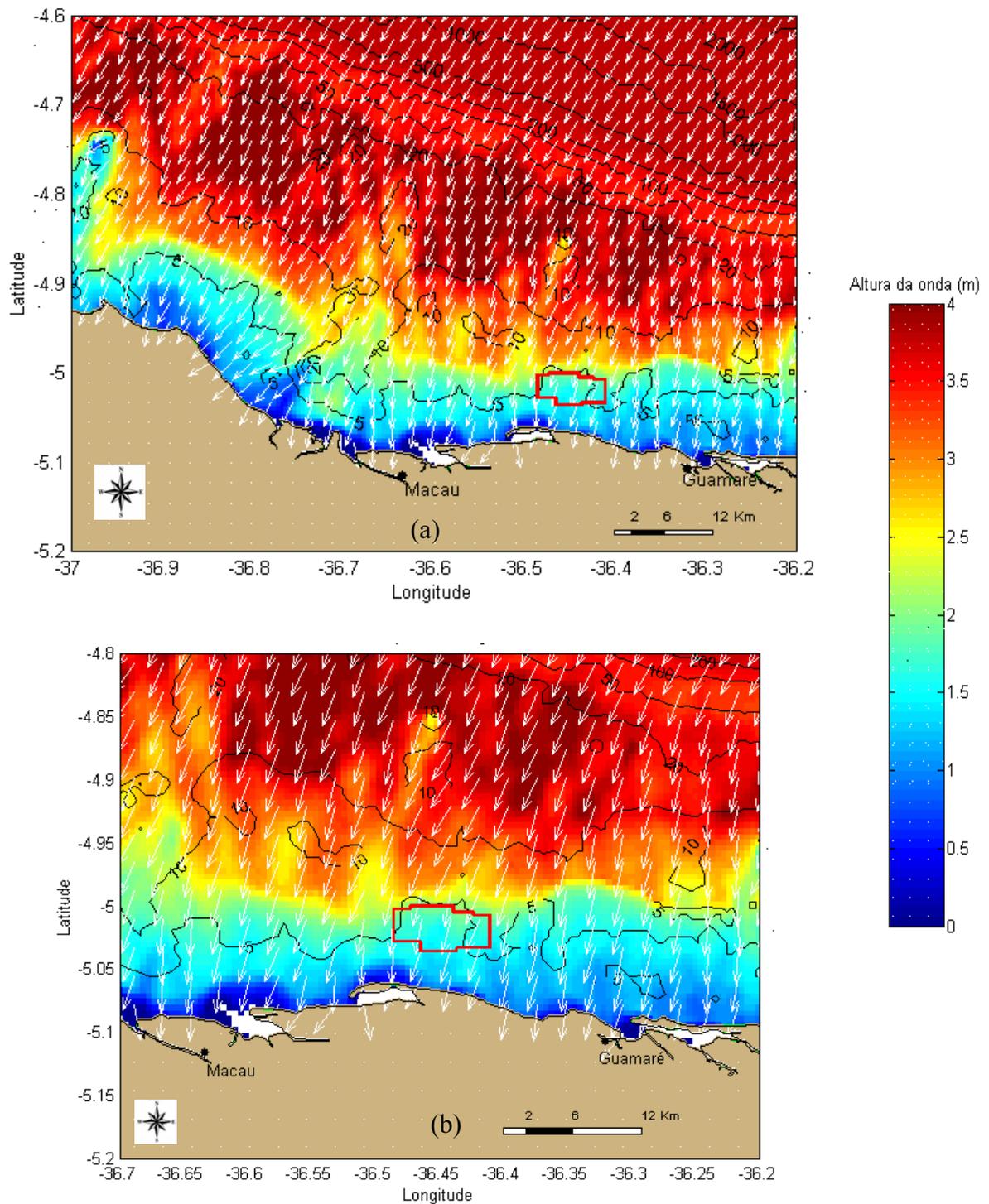


Figura II.5.1.2-21: Mapa de refração de onda gerado a partir do cenário 03 (a). O polígono em vermelho representa o domínio do Campo de Siri e a incidência das ondas em sua vizinhança está em destaque abaixo (b). A legenda de cores determina a mudança de altura da onda em metros. As isolinhas batimétricas estão representadas em preto e com os valores discriminados em metros.

D) Considerações Finais em Oceanografia

Situada dentro dos domínios da Água Tropical do Oceano Atlântico, a região oceânica da área de influência do Campo de Siri apresenta uma circulação dominada pelo regime de marés e pela componente de contorno oeste do Giro Equatorial dirigido pelo vento, representada pela Corrente Norte do Brasil (CNB). Como resultado dessa dinâmica, a coluna d'água na região apresenta-se verticalmente homogênea, com eventuais variações limitadas aos níveis superficiais devido a interações na interface oceano-atmosfera. As variabilidades sazonais das propriedades são determinadas por fenômenos de larga escala no Atlântico Tropical e seus efeitos no clima da região.

Os dados de correntes utilizados neste estudo permitiram distinguir regimes distintos dentro dos seguintes limites da Plataforma Continental na região: na plataforma Interna, até 5 metros de profundidade, com correntes médias de maré de 5 a 10 cm/s e 10 cm/s de deriva; na plataforma média, entre 5 e 20 metros, com marés entre 15-20 cm/s e 10 cm/s de deriva, e plataforma externa, entre 20 metros e a quebra, a 40-50 metros, com correntes de maré de 10-15 cm/s e médias de 15 cm/s de deriva. O transporte residual na região apresenta, portanto, forte componente zonal, fluido para oeste.

Regida pelas componentes harmônicas semi-diurnas dominantes na zona equatorial do globo, a maré apresentou amplitudes de oscilação máximas superiores a 2 metros (em sizígia) e mínimas de 1,8 metros (quadratura) em localidades litorâneas situadas da área de influência (Macau e Areia Branca).

O regime de ondas na região está fortemente associado ao campo de ventos locais, os alísios, e seu modo de variabilidade anual. O estado de mar predominante é formado por vagas de 5 a 8 segundos, vindas do quadrante leste, com altura variando entre 1 e 2 metros. Entre os meses de julho e setembro, quando os alísios de sudeste estão mais intensos, ocorrem vagas com maiores valores de altura, podendo chegar até 4 metros em situações extremas, segundo dados do BNDO. Valores extremos também estão associados aos marulhos de nordeste, originados a partir de furacões extra-tropicais do Atlântico Norte, entre agosto e setembro, quando ondas de longo período (> 10 segundo) e alturas superiores a 3 metros são registradas.

E) Anexos