



MODELAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA NO ESTUÁRIO DE DIOGO LOPES, RIO GRANDE DO NORTE

Maria de Fátima F. MATOS

DG/PPGG/UFRN, C.P. 1596, CEP 59078-970, Natal, RN, Brasil, + 558432153215, fatimaalves@geologia.ufrn.br

Conceição J.E.M. FORTES

Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351.218443451, jfortes@lnec.pt

Venerando E. AMARO

DG/PPGG/UFRN, C.P. 1596, CEP 59078-970, Natal, RN, Brasil, +558432153212, amaro@geologia.ufrn.br

Ada C. SCUDELARI

PPGES/ UFRN, CEP 59078-970, Natal, RN, Brasil, +558432153766, ada@ct.ufrn.br

RESUMO

O litoral norte do estado do Rio Grande do Norte, situado na região nordeste do Brasil, concentra importantes atividades de exploração de petróleo e gás natural, indústria de sal, carcinicultura e pesca, além de outras atividades de menos escala. A indústria em particular, concentra-se em áreas offshore e instaladas em águas rasas, entre as cotas de 6 a 30 metros de profundidades. Nesta região a dinâmica costeira é intensa, principalmente pela ação das ondas, correntes e marés que interagem sobre importantes ambientes ali presentes. Atualmente, a região vem sendo alvo de muitos estudos interdisciplinares, entre eles, os voltadas para entendimentos dos processos dominados por ondas. Essencialmente, nos estudos relacionados às ondas, correntes e marés, são importantes para a caracterização da agitação marítima do litoral. Nesta comunicação, descreve-se as medições hidrodinâmicas: ondas, efectuadas na região e uma aplicação do modelo SWAN à zona marítima na costa norte do Rio Grande do Norte na região adjacente do estuário de Diogo Lopes, entre os municípios de Macau e Guamaré. Os resultados numéricos são comparados com os dados obtidos em campanhas de medições *in situ* de modo a avaliar o desempenho do modelo SWAN para a região.

Palavras-Chave – Dados in-situ, Modelação numérica, Propagação de ondas, Nordeste do Brasil, SWAN.

1 INTRODUÇÃO

A possibilidade de prever com mais precisão a geração e transformação de ondas desde o largo até a zona costeira, subentende-se como de fundamental importância para a compreensão dos processos costeiros (Sampaio, 2008). Mais concretamente, o conhecimento do padrão de propagação de ondas na zona costeira, é assim, de extrema relevância para estudos de morfodinâmica costeira e dinâmica sedimentar, bem como para qualquer obra de engenharia costeira a ser aí implantada.

Na sua propagação, as ondas podem sofrer os efeitos de diversos fenômenos físicos, dos quais se salientam os associados à variação da profundidade, à transmissão de energia ao longo da crista da onda, à ocorrência de rebentação, à dissipação de energia por atrito de fundo, à sua reflexão total ou parcial e à existência de obstáculos. Sendo assim, para maior conhecimento e previsão das características das ondas, a aquisição de dados de campo para monitorização ambiental *in situ* e o recurso à modelação numérica, têm sido amplamente usados. Com efeito, a monitorização *in situ* é, sem dúvida, a melhor técnica para a caracterização dos parâmetros de ondas numa dada região costeira, pois os dados obtidos são o resultado dos vários fenômenos que afetam a propagação de ondas que atingem a referida zona costeira.

No entanto, este monitoramento de ondas é feito de forma pontual quer no espaço como no tempo pelo que o recurso à modelação numérica para caracterizar os principais processos de geração e propagação de ondas na mesma é muito vantajoso, pois permite a caracterização espacial da zona a estudar e principalmente uma análise a curto, médio e longo prazo, constituindo por isso uma importante ferramenta de gestão costeira. Um dos mais utilizados modelos na geração e previsão da agitação marítima é o modelo SWAN (Booij *et al.*, 1999), que permite o cálculo de geração da evolução do espectro direcional desde a zona de geração à zona costeira. Mas como qualquer modelo numérico, são baseados em aproximações e hipóteses, apresentando por isso limitações na descrição precisa das ondas na zona em estudo. Além disso, este tipo de modelos envolve uma série de parâmetros que têm de ser calibrados para cada caso de estudo, recorrendo, por exemplo, a dados adquiridos *in situ*.

Assim, o recurso conjunto à monitorização ambiental e à aplicação dos modelos numéricos, torna-se ainda mais importante em áreas onde a dinâmica costeira é intensa e as atividades econômicas exercem importância no contexto regional e nacional, como é o caso da exploração do petróleo e gás natural na costa norte do litoral do estado do Rio Grande do Norte, nordeste do Brasil.

Uma aplicação preliminar do modelo SWAN a esta zona já foi realizada por Nascimento *et al.* (2011), considerando um período curto de medições 11 e 12 de Dezembro de 2010. Embora o modelo tenha conseguido reproduzir razoavelmente o andamento geral dos valores medidos *in situ*, verificaram-se algumas diferenças significativas. Tais podem ser consequência de certas simplificações que tiveram de ser admitidas nos cálculos efectuados, por falta de informação, nomeadamente no que diz respeito aos ventos (ventos constantes em todo o domínio computacional e baseados nos valores obtidos na Estação Meteorológica de Macau), às marés (não houve variação da maré ao longo do período de simulação) e às correntes (não se incluíram nos cálculos as correntes). Além disso, a comparação foi efectuada só em termos de altura de onda significativa e o período de tempo em causa é demasiado curto para generalizar o comportamento do modelo.

Neste sentido e de modo a estender o trabalho anterior, é efectuada uma aplicação do modelo SWAN para um período de tempo superior (2 semanas) e considerando a variação da maré ao longo do período de simulação. Assim, para as condições de agitação, vento e marés verificadas nos dias das campanhas, comparam-se resultados numéricos com as medições *in situ* de modo a avaliar a capacidade do modelo em descrever a situação real de propagação de ondas na zona em estudo.

Após esta introdução segue-se uma breve descrição da zona em estudo (Capítulo 2) e das medições efectuadas *in situ* nas campanhas de campo (Capítulo 3). De seguida, apresenta-se a descrição do modelo SWAN e das suas condições de aplicação à zona marítima na costa norte do Rio Grande do Norte. Efectua-se também a apresentação, a discussão dos resultados obtidos e a comparação com dados *in situ* (Capítulo 4). Finalmente, apresentam-se as conclusões do estudo.

2 CARACTERÍSTICAS DA ZONA EM ESTUDO

2.1 Dados Gerais

A região adjacente ao estuário de Diogo Lopes, no Nordeste do Brasil, Figura 1, apresenta-se como uma área de intensa instabilidade morfológica, pronunciadas pelos processos de erosão e acresção da linha, resultantes das ação constantes das ondas, das variações do nível do mar, das condições climáticas da natureza, das sequências geológicas, das atividades neotectônicas e do suprimento de sedimentos carreados pelos rios e oceano, que controlam o desenvolvimento de feições erosivas e construtivas na faixa litorânea (Souto *et al.* 2006). Possui um vasto potencial econômico proveniente dos recursos naturais lá encontrados, como o sal, a carcinicultura, o petróleo e gás natural.

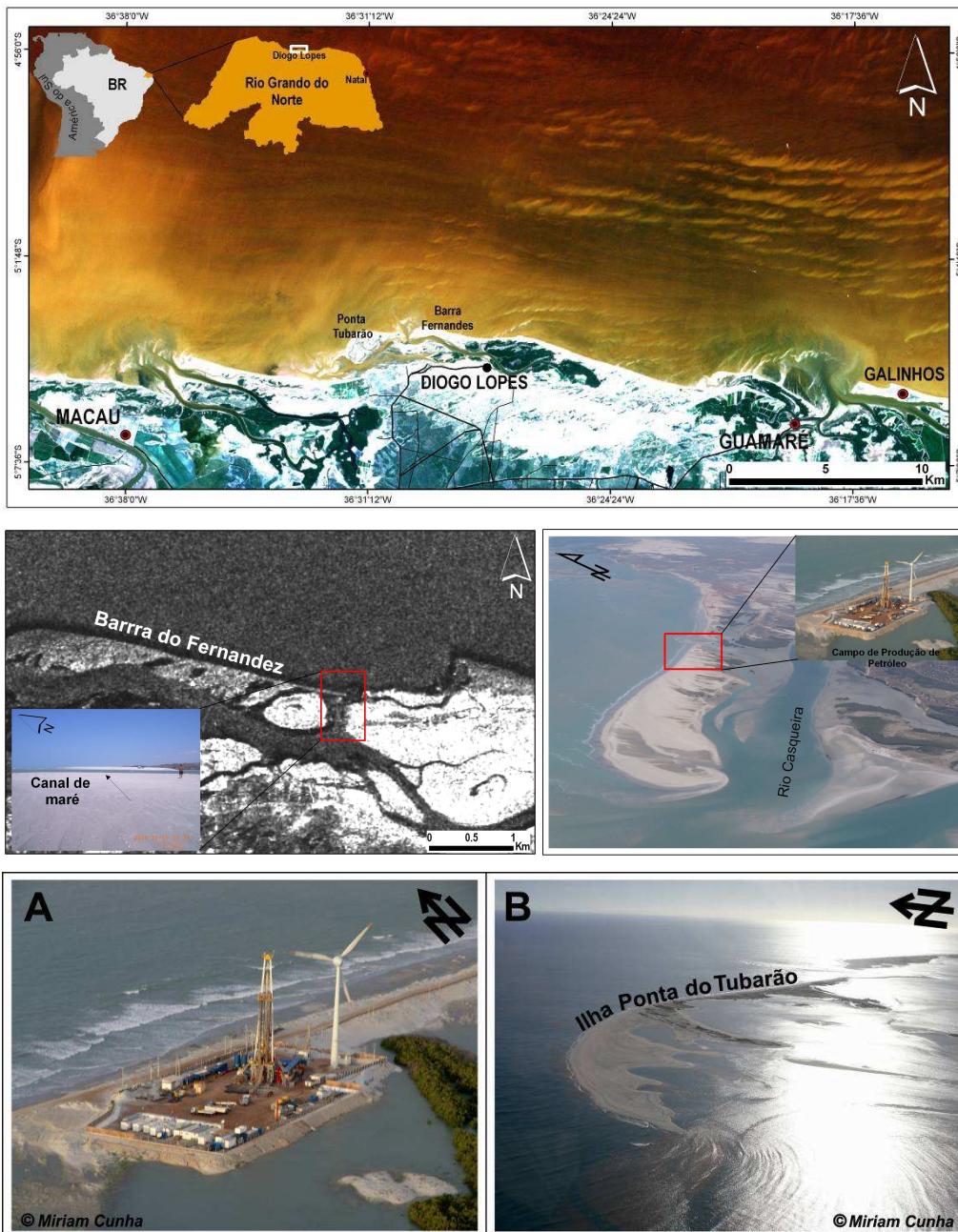


Figura 1. (A) Exemplo da actividade petrolífera nas ilhas barreiras (B) Vista geral da área adjacente da Ilha Ponta do Tubarão. Foto: Miriam Cunha, acervo GEOPRO/DG/UFRN.

O Estado do Rio Grande do Norte é o maior produtor de sal do país e a produção de petróleo e gás natural em terra (17.879.946 barris/ano ANP 2010) e mar (5.118.644 barris/ano ANP 2010) é altamente relevante na produção nacional. As atividades petrolíferas instaladas envolvem a prospecção, exploração e transporte de petróleo e gás natural, e mantém a área, que apresenta uma vulnerabilidade ambiental e natural elevadas (Grigio *et al.*, 2005, Boori *et al.*, 2010), em constante risco ambiental.

Por conta da intensa dinâmica de uso e ocupação da região associada à dinâmica natural, esta tem sido alvo de estudos interdisciplinares que tentam contribuir para o entendimento dos processos costeiros presentes e que são responsáveis pelas intensas mudanças observadas neste meio ambiente.

No entanto, as informações existentes referentes a dados ondas, ainda são insuficientes e carentes de uma periodicidade constante de monitoramento. Neste item vale ressaltar a importância dos programas de monitoramento ambiental da região em estudo e, em especial de caracterização das ondas ao longo da praia de São Bento do Norte à leste da Ponta do Tubarão, pela equipe de trabalho do Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Geologia, da Universidade Federal do Rio Norte. Dos diferentes estudos efetuados, Tabosa *et al.* (2002) obteve altura de onda significativa na região próxima a Guamaré, de 50 cm, com período médio de 1.20 s; Silveira (2002) constatou na região do estuário de Guamaré valores mínimos de onda de 23 cm com período de 7.2 s (Outubro) e altura significativa de 77 cm e período de 4.9 s (novembro); Lima (2002, 2006) em Galinhos registrou valores de altura significativa de 65 cm e períodos de ondas de 12 s, e valores mínimos de 35 cm e períodos de 5 s, 1 s; Chaves (2005) registrou altura significativa de onda de 35 cm com período médio de 7.5 s nas proximidades de Serra/Macau.

2.2 Localização da Área de Estudo

A área de estudo está situada no mar (Figura 2), na porção interna da plataforma continental adjacente, do litoral norte do Nordeste Brasileiro, entre as coordenadas: 5°55'0"S - 36°39'0"W e 4°49'0"S - 36°17'0"W, mais precisamente na região adjacente do estuário de Diogo Lopes, entre as profundidades de 6 a 30 metros, onde se encontram instaladas as bases de exploração de petróleo e gás natural, e muito próximo a praia há bases instaladas (Figura 2 - 1a).

O relevo litorâneo do trecho estudado possui níveis topográficos suavemente planos desde a zona de praia (*backshore*) se estendendo pela zona interior (*inshore*) ao largo (*offshore*), onde os processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos são fortemente influenciados pela ação das ondas, correntes e ventos. Tais efeitos são evidenciados na morfologia da atual linha de costa (Figura 2 - 1b e 1c).

Em termos de batimetria, a zona marítima adjacente à zona ao estuário de Diogo Lopes, caracteriza-se por uma região de plataforma muito extensa e de baixas profundidades (inferiores a 50 m), numa distância de cerca de 40 km em relação à atual linha de costa. Após esta região, as profundidades são significativamente maiores com desnível superior a 2000 m sobre o talude e o sopé continental (Gomes, 2009).

De acordo com os estudos ambientais da PETROBRAS (Nascimento, 2009) e estações meteorológicas do INMET (2010), na área do estudo os ventos sopram predominantemente de nordeste-leste nos meses de Outubro a Abril, e, nos meses de Maio a Setembro de sudeste. Tabosa *et al.* (2004) obtiveram valores entre 6.94 a 10.19 m/s para os ventos provenientes de nordeste e 6.07 a 4.22 m/s para os ventos sudeste. Os ventos sudeste são ainda a segunda direção predominantemente em Abril e Setembro (Inverno). De Outubro a Março (Verão) a

segunda direção predominante é a nordeste. Geralmente, eles são mais fortes em Setembro e Outubro (média de 7.0 m/s e 7.1 m/s e de E/SE) e mais fracos em março e abril (média de 4.4 m/s e 4.6 m/s e de leste). A Figura 3 mostra a análise dos ventos de 2001 – 2006.

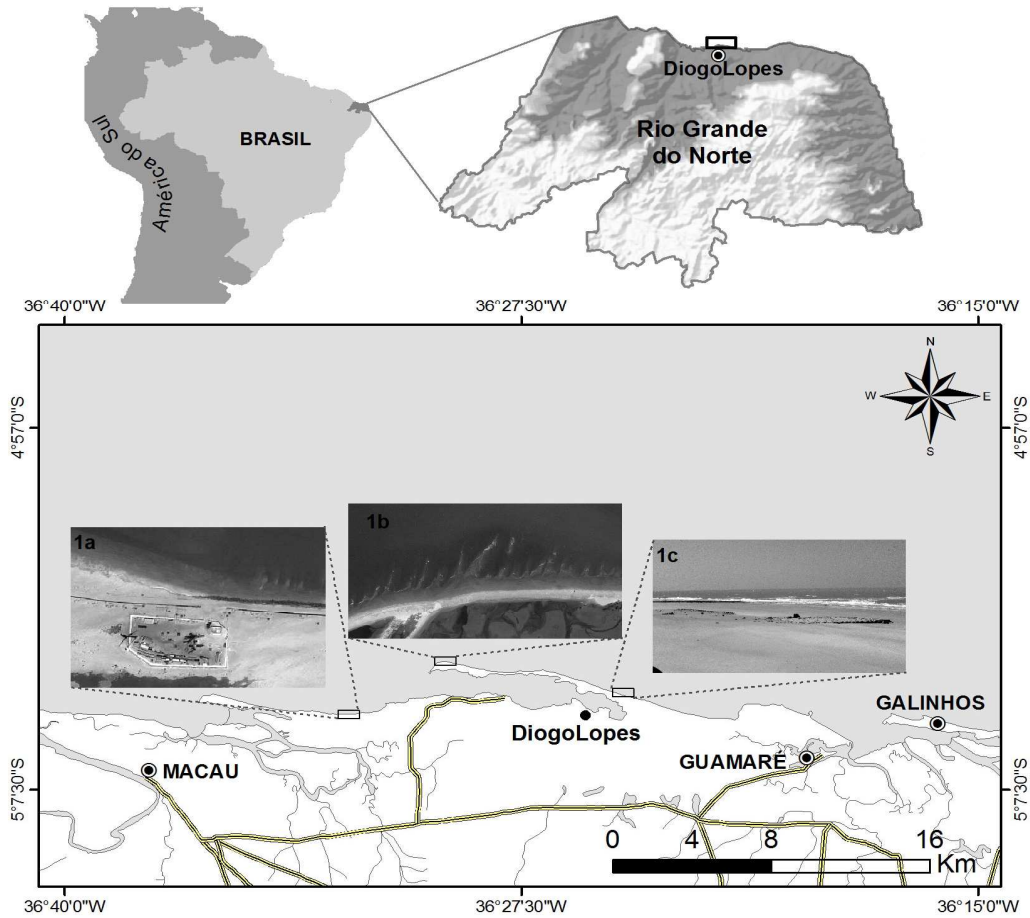


Figura 2. Mapa de localização da área de estudo. Uso e ocupação da zona costeiras e processos associados: 1a) atividade petrolífera; 1b) barras transversais a costa da Ilha Ponta Tubarão, 1c) morfologia de praia dissipativa.

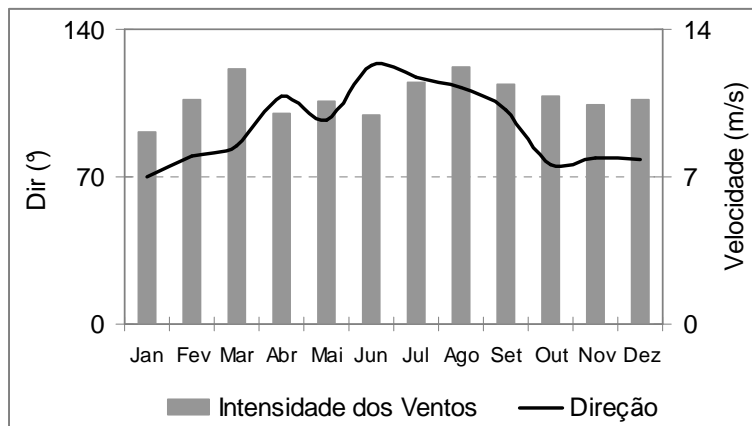


Figura 3. Variação mensal das características de ventos (velocidade e direcção) na região do estuário de Diogo Lopes (INMET, 2010).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Em Matos *et al.* (2011), descreveram-se com maior pormenor as campanhas de medições de ondas efectuadas por vários instrumentos na zona marítima próxima da ilha do Tubarão. Aqui neste trabalho essa descrição é feita sumariamente e dá-se maior ênfase ao tratamento efectuado e respectiva análise dos dados. Para essa análise, apresentam-se também as características dos ventos medidos na estação Meteorológica de Macau, naqueles períodos de medição.

3.1 Medições *in situ*

Os dados referentes aos parâmetros de ondas foram obtidos por meio de medidores acústicos do tipo ADCP, fundeados nos locais apresentados na Figura 4. As campanhas de medições foram efetuadas no período de Novembro de 2010 e Fevereiro de 2011.

As medições sucessivas foram realizadas com o intuito de obter um universo amostral significativo de dados. Os equipamentos foram posicionados em: X = 779765E e Y = 9447091N (PT1) e X = 766768E e Y = 9441999N (PT2). O PT1 foi fundeado em profundidade de 12 m com distância de 8 km da atual linha de costa e o PT2 foi fundeado na profundidade de 8m e distante cerca de 4 km da atual linha de costa.

O universo de amostragem dos dados foi obtido com uma média a cada 30 minutos sequenciais durante todo o período dos dias de medições.

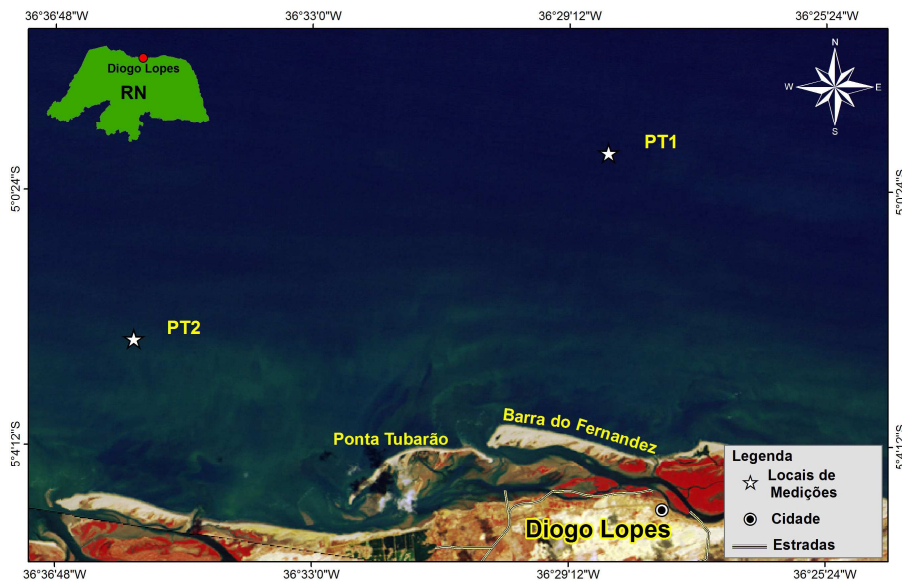


Figura 4 - Mapa dos locais de medições e fundeio dos equipamentos.

3.2 Tratamento e Análises dos Dados de Ondas

Os dados de ondas definidos para as análises deste trabalho foram submetidos ao tratamento que compreendeu inicialmente a correção dos valores de profundidades em relação à profundidade do equipamento e posteriormente a filtragem dos parâmetros de ondas.

O método usado para as análises dos dados de ondas, foi o Método da Máxima Verossimilhança MLMST, com superfície de controle, método padrão para estimar espectros de ondas direcionais (Khama *et al.*, 2005, Pedersen *et al.*, 2007). O método é mais adequado para

implementações em situações onde as ondas estão mais expostas a correntes significativas, como é o caso das meso-marés da área de estudo em questão.

Dentre os meses de medições realizados pelos ADCP's, foram selecionados dois períodos distintos para a análise dos dados de ondas, que servirão de comparação como os resultados do modelo numérico. Para cada período foi definido um conjunto de sete (7) dias contínuos que coincidem com as maiores variações das amplitudes das marés, portanto, definiram-se os dias que compreenderam as fases de sizígia, uma vez que a região está submetida ao regime e influência das correntes de meso-marés.

Na Tabela 1 e na Tabela 2 mostram-se as gamas e a média de valores das características das ondas nos períodos de 20 a 27 de Dezembro de 2010 e de 15 a 22 de Fevereiro de 2011, para os locais PT1 e PT2, respectivamente.

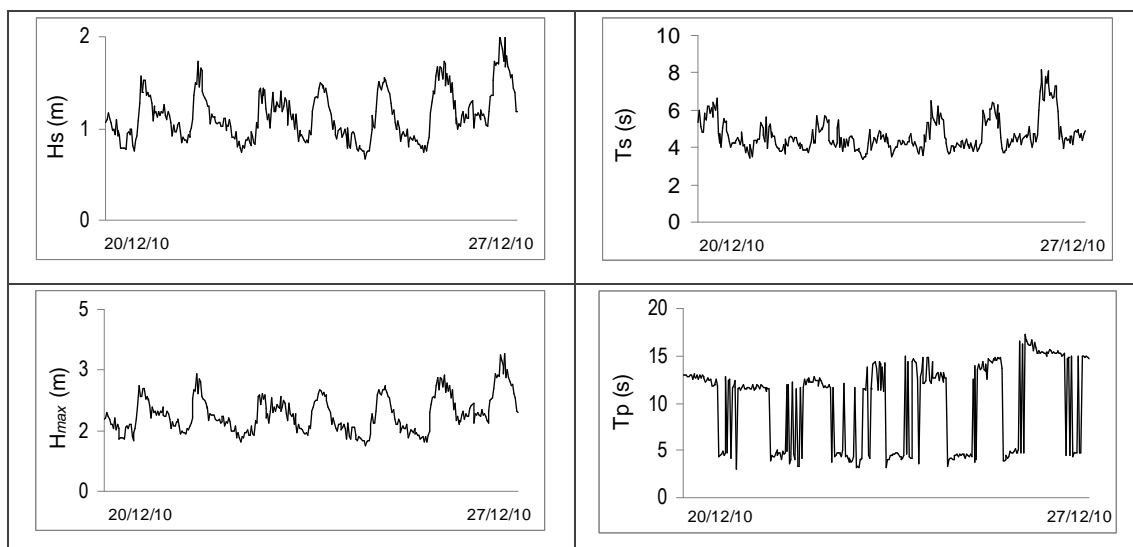
Na Figura 5 e na Figura 6 são apresentados as análises espectrais efetuadas aos registros obtidos em cada período, permitiu obter os valores da altura de onda significativa H_s (m), altura máxima H_{max} (m), período significativo T_s (s), período de pico T_p (s), direção média, DIR_{med} ($^\circ$) e direção de pico, DIR_{TP} ($^\circ$) ao longo do período das campanhas.

Tabela 1 - Estatísticas das ondas do PT1

	HS	H_{max}	TS	TP	DIR_med	DIR_Tp
Máxima	1.92	3.21	6.63	15.26	359.93	360
Mínima	0.64	1.07	3.36	3.04	1	0.11
Média	1.12	1.87	4.47	8.92	83.86	112.15

Tabela 2 - Estatísticas das ondas do PT2

	HS	H_{max}	TS	TP	DIR_med	DIR_Tp
Máxima	4.53	7.56	7.85	16.50	353.66	357.69
Mínima	0.66	1.10	5.54	2.94	1.65	1.89
Média	2.13	3.56	3.17	10.12	172.46	201.93



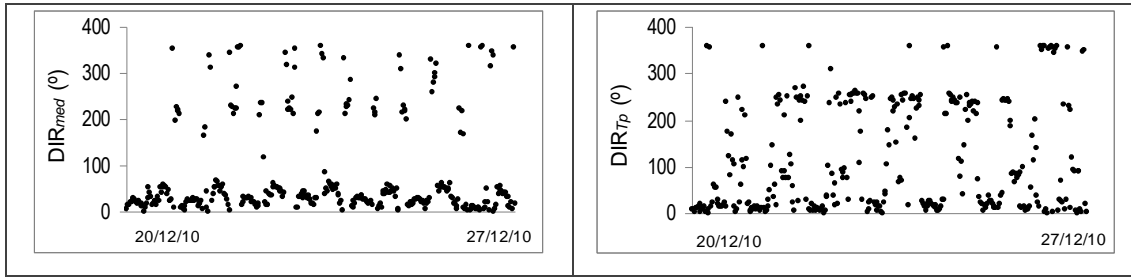


Figura 5 - Características da agitação marítima medida pelo instrumento PT1: altura significativa (HS), altura máxima H_{max} (m), período significativo TS (s), período de pico TP (s), direção média, DIR_med ($^{\circ}$) e direção de pico, DIR_TP ($^{\circ}$), no período de 20 a 27 de Dezembro de 2010.

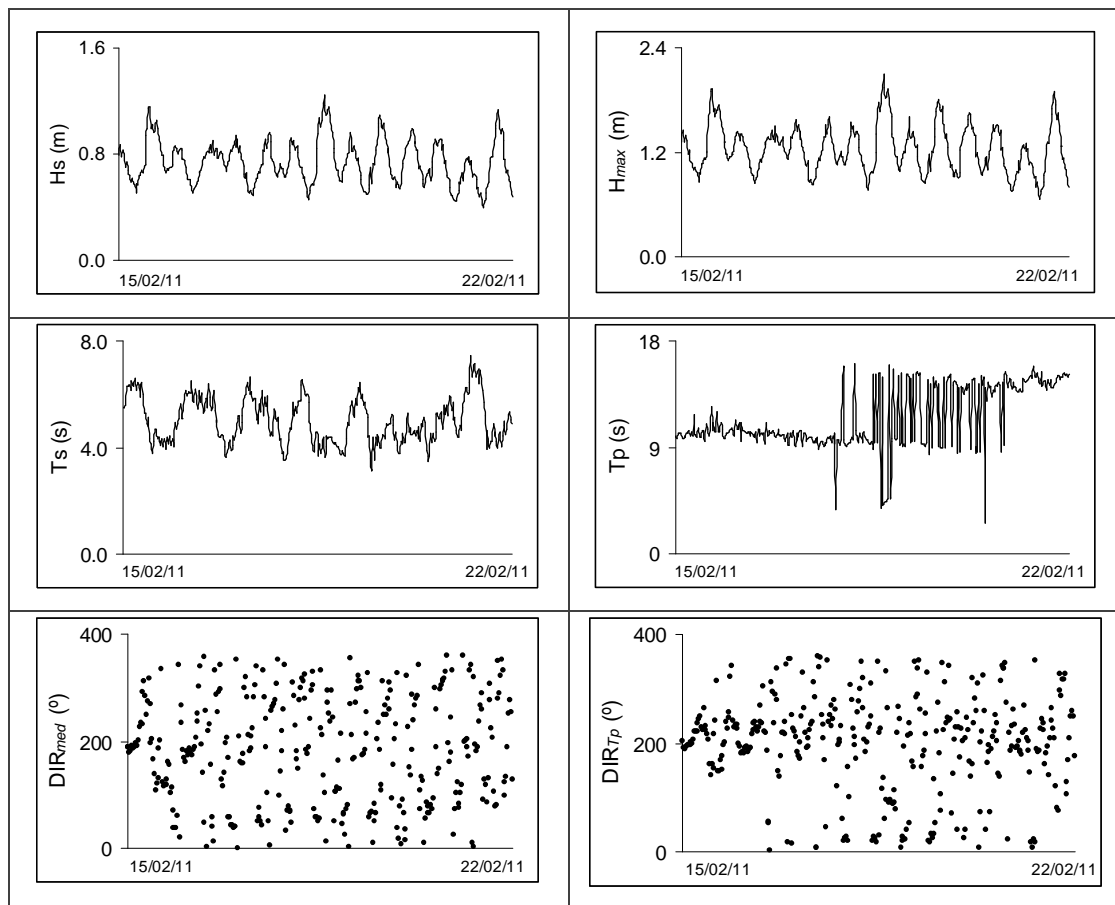


Figura 6 - Características da agitação marítima medida pelo instrumento PT2: altura significativa (HS), altura máxima H_{max} (m), período significativo TS (s), período de pico TP (s), direção média, DIR_med ($^{\circ}$) e direção de pico, DIR_TP ($^{\circ}$), no período de 15 a 22 de Fevereiro de 2011.

De modo a analisar e caracterizar este tipo de agitação, apresentam-se os dados de ventos (velocidade e direcção do vento) para os dois períodos distintos, 20 a 27 de Dezembro de 2010 e 15 a 22 de Fevereiro de 2011 obtidos da estação Meteorológica que está localizada na área do município de Macau, nas coordenadas: Latitude -5.1150° e Longitude -36.7156° .

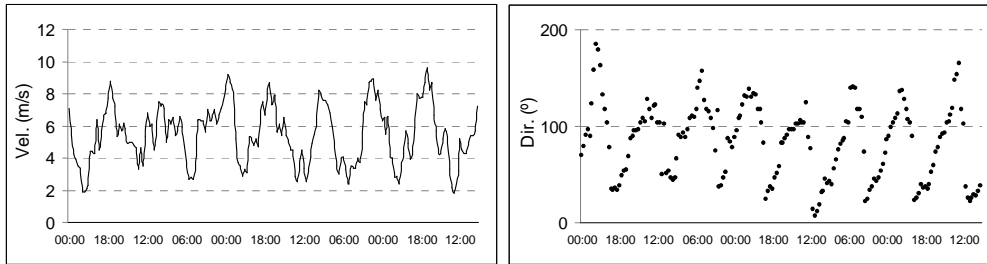


Figura 7 - Características dos ventos (vel (m/s), Dir(°)) nos dias 20 a 27 de Dezembro de 2010.

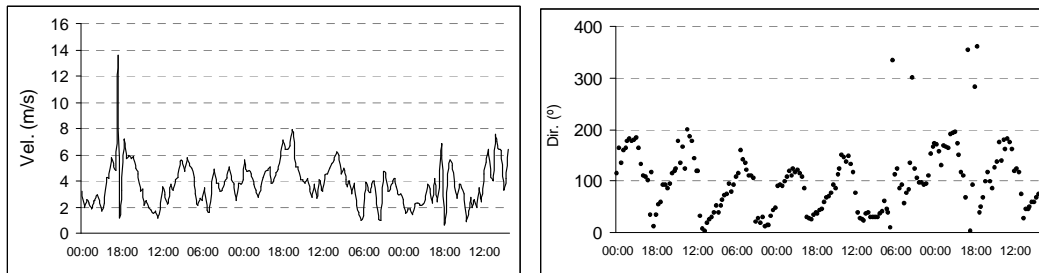


Figura 8 - Características dos ventos (vel (m/s), Dir(°)) nos dias 15 a 22 de Fevereiro de 2011.

Apresentam-se também os valores da maré, obtidos da estação Maregráfica da DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação) de Macau nos períodos de 20 a 27 de Dezembro de 2010 e de 15 a 22 de Fevereiro de 2011 (Figura 9).

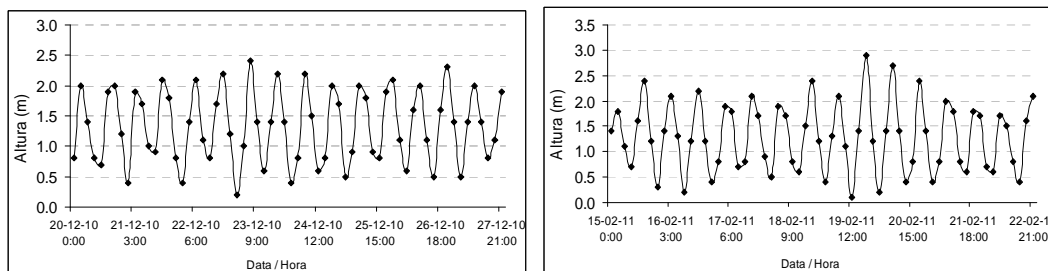


Figura 9 – Nível de maré nos dias 20 a 27 de Dezembro de 2010 e 15 a 22 de Fevereiro de 2011.

4 APLICAÇÃO DO MODELO SWAN

4.1 Introdução

Nesta secção, descreve-se a aplicação efectuada com o modelo SWAN para a zona em estudo com vista a caracterizar o padrão de ondas geradas pelo vento. As simulações numéricas foram obtidas para as condições de agitação ao largo e de ventos verificadas nos dias das campanhas. O procedimento seguido foi:

- Utilização como condições ao largo do SWAN as fornecidas pelo modelo de geração WAVEWATCH III (Tolman, 1999), para o período de 20 a 27 de Dezembro de 2010 e de 15 a 22 de Fevereiro de 2011;

- Utilização dos dados de ventos da estação meteorológica de Macau no período de 20 a 27 de Dezembro de 2010 e de 15 a 22 de Fevereiro de 2011;
- Utilização dos dados de marés no período de 20 a 27 de Dezembro de 2010 e de 15 a 22 de Fevereiro de 2011;
- Cálculo das características das ondas (HS, Tmed, DIR_med) em diferentes posições, utilizando o modelo SWAN para os períodos referidos;
- Comparação dos valores numéricos das alturas de onda significativas, direcções médias e períodos médios com as medições efectuadas nos pontos PT1 e PT2.

Assim, após a descrição do modelo numérico, apresenta-se as principais condições de aplicação do modelo SWAN e os resultados obtidos. Efectua-se também a comparação desses resultados com as medições efectuadas *in situ*.

4.2 Descrição do Modelo Numérico

O modelo SWAN (Booij *et al.*, 1999) acrónimo de Simulating WAVes Nearshore é um modelo numérico para geração, propagação e dissipação da agitação marítima, baseado na equação para a conservação da acção de onda. Trata-se de um modelo de domínio público (freeware), em constante desenvolvimento pela *Delft University of Technology* da Holanda, que possui como uma das maiores vantagens a manutenção da estrutura dos ficheiros de dados e de resultados o que permite a fácil actualização de versões mais robustas e completas do modelo sempre que necessário.

Este modelo propaga a agitação marítima desde o largo até próximo da costa considerando os processos físicos de refacção, difracção e empolamento devido a variações do fundo e presença de correntes, crescimento de onda por acção dos ventos, rebentação por influência do fundo e por excesso de declividade (*whitecapping*), dissipação de energia devido à fricção do fundo, bloqueio e reflexão por correntes opostas e transmissão através de obstáculos.

O campo de ondas na zona é caracterizado pelo espectro bidimensional de densidade da acção da agitação marítima. Com esta representação, é possível a aplicação do modelo em áreas onde o crescimento da agitação marítima pela acção do vento seja notável ou onde estados de mar, ou mesmo ondulação, estejam presentes. A propagação da agitação, nos modos estacionário ou não estacionário, nos espaços geográfico e espectral, é realizada utilizando esquemas numéricos implícitos. A zona em estudo pode ser descrita com coordenadas cartesianas ou esféricas, utilizando uma malha "rectangular".

Os dados necessários para a execução do SWAN são a malha batimétrica da zona a modelar e as condições de agitação na fronteira de entrada do domínio, para além de um conjunto de outros parâmetros de cálculo. De entre os vários resultados obtidos pelo SWAN destacam-se a altura significativa, os períodos de pico e médio, as direcções de pico e média, a dispersão direcciona, o parâmetro de largura de banda e nível de água em qualquer parte do domínio computacional.

Para a preparação dos dados, execução e visualização dos resultados do modelo SWAN também se utiliza a ferramenta SOPRO, Fortes *et al.* (2007).

De entre as limitações do modelo refira-se:

- A calibração dos muitos dos parâmetros envolvidos na descrição dos diferentes fenómenos físicos no SWAN utilizou dados da campanha JONSWAP, que foi realizada no Mar do Norte (Hasselmann et al., 1973). Tais parâmetros poderão não estar correctos para áreas com diferentes características de clima de ondas (ondas associadas ao estado de mar vaga e ondulação) ou diferentes características do fundo marinho;
- A difracção no SWAN, sendo modelada de modo simples como uma dispersão direccional, pode ser considerada a sua principal limitação;
- A inclusão da difracção nos cálculos numéricos implica que o espaçamento da malha computacional, relativamente ao comprimento de onda, seja tal que garanta a convergência dos cálculos computacionais. Tal implica, por vezes, que as malhas sejam de tão grande dimensão que podem inviabilizar a execução dos cálculos;
- Outro ponto importante é a influência das condições de fronteira nos resultados do modelo SWAN em certas zonas do domínio de cálculo.

4.3 Condições de Aplicação do Modelo

4.3.1 Condições ao largo

Consideraram-se como condições ao largo os estados de mar ao largo estimados pelo modelo de 3^a geração e propagação de ondas WAVEWATCH (WWIII) (Tolman, 1999). Estas estimativas contêm os parâmetros de onda seguintes: HS (altura de onda significativa), TP (período de pico) e DIR (direcção de onda associada ao período de pico), obtidas a cada três horas, referentes ao período de 20 de 27 de Dezembro de 2010 e de 15 a 22 de Fevereiro de 2011, para o ponto da malha 3°S36°W, seleccionado por estar localizado o mais próximo da ilha Ponta do Tubarão.

Os valores HS, TP e DIR_TP considerados ao largo são apresentados na Figura 10

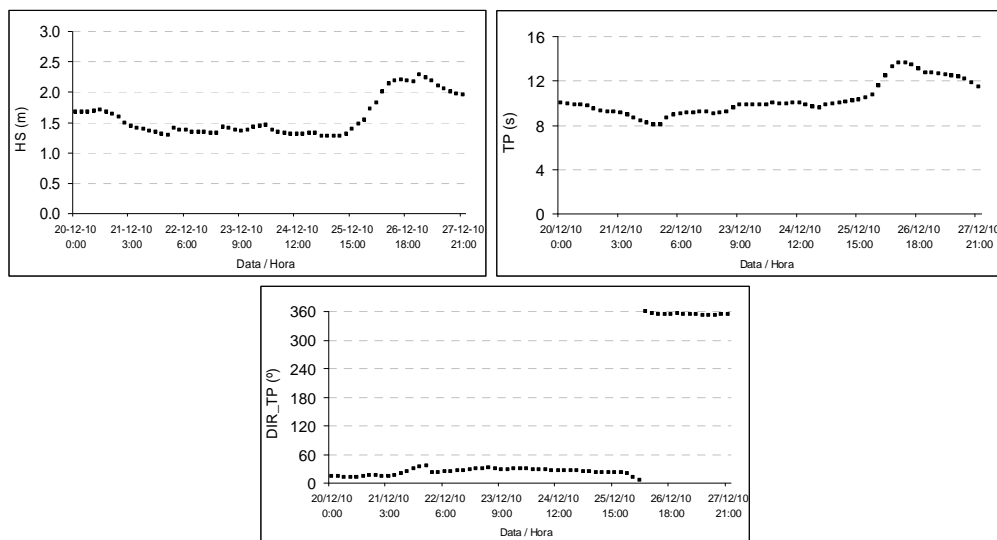


Figura 10 - Valores de HS, TP e DIR_TP do modelo de 3^a geração WWIII, 20 de 27 de Dezembro de 2010, para o ponto da malha 3°S36°W.

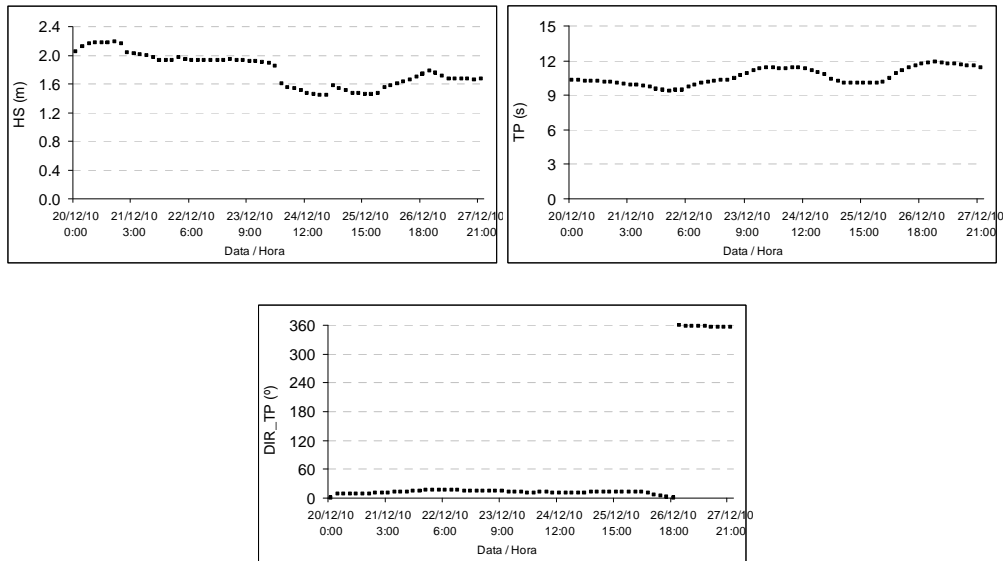


Figura 11 - Valores de HS, TP e DIR_TP do modelo de 3^a geração WWIII, 15 a 22 de Fevereiro de 2011, para o ponto da malha 3°S36°W

Uma vez conhecidas as estimativas do estado ao largo, caracterizado pela sua altura de onda significativa, HS, período de pico, TP, e a direcção de pico, DIR_TP, o modelo SWAN é capaz de transferir esses valores para a zona de estudo.

4.3.2 Domínio Computacional e Condições do Modelo SWAN

A batimetria empregue no modelo SWAN (Figura 4) foi obtida das cartas náuticas 720 da DHN (Directoria de Hidrografia e Navegação). Nas áreas próximas a linha de costa e das Ilha barreiras, áreas muito rasas, onde não foi recoberto pelos registos da DHN, as informações foram obtidas dos levantamentos batimétricos realizados em 2005 pela UFRN e PETROBRAS.

Para os cálculos com o modelo SWAN, utilizaram-se três malhas encaixadas, Figura 12. A primeira malha abrange toda a região ao largo da zona de Macau a Guimarães com dimensões de 100 km por 62 km e espaçamento de 500 metros. Uma segunda malha mais refinada, próxima e encaixada na primeira, foi definida com uma resolução de 250 metros, num total de 50 km por 20 km (Figura 12). Uma terceira malha ainda mais refinada, próxima e encaixada na segunda, que foi definida com uma resolução de 50 metros, num total de 30 km por 10 km (Figura 12). As características dessas malhas estão indicadas na **Error! Reference source not found.**

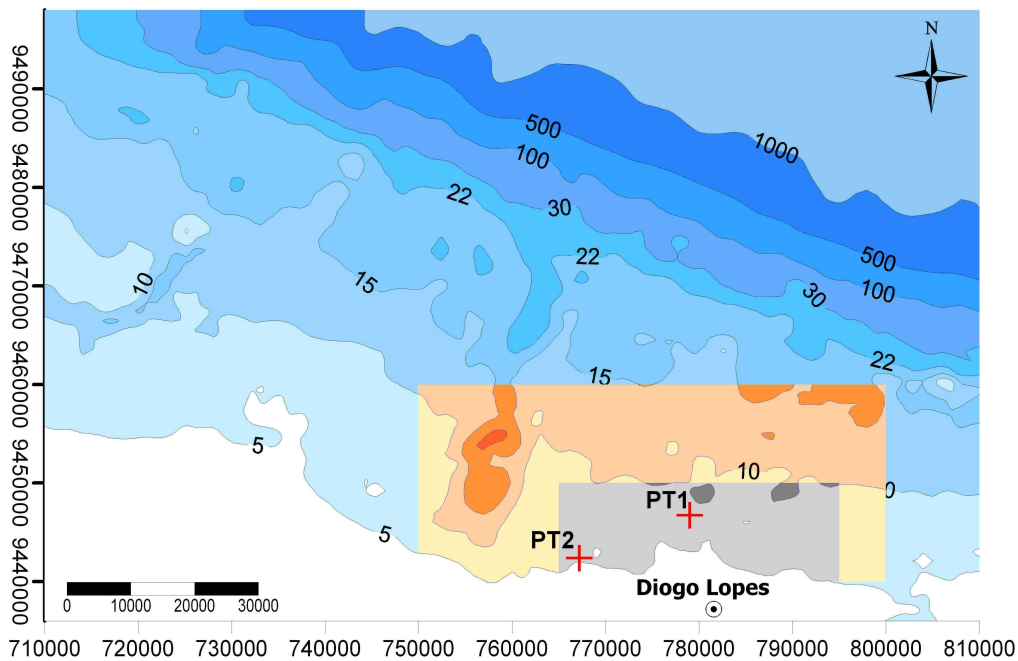


Figura 12. Malhas utilizadas nas simulações feitas com o SWAN.

Tabela 3- Características das malhas utilizadas na simulação com o SWAN.

	X inicial	Y inicial	Nº. DX	Nº. DY	DX (m)	DY (m)
1ª Malha	710000	9436000	200	124	500	500
2ª Malha	750000	9440000	100	80	500	250
3ª Malha	765000	9440000	120	100	250	100

A necessidade de utilização de mais que uma malha de cálculo está relacionada com a expectativa de melhor desempenho do modelo numérico face à utilização de apenas uma, quer no que se refere à qualidade da previsão, quer ao tempo necessário ao cálculo.

As características da agitação ao largo, provenientes do modelo WWIII, Figura 10, constituem a condição de fronteira na malha global em um ou dois dos lados dessa fronteira, dependendo da direcção daquela agitação. Os resultados da malha global fornecem as condições de fronteira para a 2ª malha, e os resultados desta malha fornecem as condições de fronteira para a 3ª malha.

Para execução do modelo, chegou-se à seguinte configuração:

- Utilização da versão SWAN 40.72, em modo estacionário sem correntes;
- Consideração dos dados de ventos na malha 1, admitindo constância dos valores de velocidade e de direcção em todo o domínio. Os valores são correspondentes aos obtidos na Estação Meteorológica de Macau;
- Utilização dos dados de maré provenientes de estação maregráfica de Macau;
- Utilização de um espectro direccional tal que a discretização de um espectro em frequência de JONSWAP contém 21 intervalos, de 0.07 a 2.0 Hz, com distribuição logarítmica, e a discretização em direcção cobre 270°, dividida em 21 intervalos ($\Delta = 10^\circ$);
- Foi adoptado um coeficiente de rebentação constante igual a 0.65;

- Foi usada a lei de JONSWAP, adoptando como parâmetro de atrito de fundo o valor de 0.015.
- Os fenómenos físicos incluídos foram:
 - Na 1^a malha global: refacção, o empolamento e a rebentação por influência do fundo e do excesso de declividade (*whitcapping*), difracção, interacções onda-onda quadruplets (*quadruplet wave-wave interactions*);
 - Nas 2^a e 3^a malhas: refacção, o empolamento e a rebentação por influência do fundo e do excesso de declividade (*whitcapping*), interacções entre tríades de ondas (*triad wave-wave interactions*), a geração de harmónicas (*frequency shifting*) e difracção.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Introdução

Para as condições de cálculo estabelecidas no item anterior, efectuaram-se os cálculos com o modelo SWAN. Assim obtiveram-se os valores de altura significativa (HS), o período médio (Tmed), o período de pico (TP), a direcção média (DIR_med), a direcção de pico (DIR_TP), o comprimento de onda (L) e a dispersão direcciona, em todo o domínio de cálculo total junto à costa entre Macau e Guamaré (Figura 4) e em especial nas posições dos instrumentos de medição PT1 e PT2 .

Para os pontos PT1 e PT2, comparam-se os resultados numéricos e medidos relativos a HS, Tmed, DIR_med, para avaliar o desempenho do modelo.

5.2 Características da agitação marítima em todo o domínio de cálculo

Na Figura 9. apresentam-se os resultados relativos à propagação efectuada com o SWAN, para um estado de agitação incidente verificado no dia 26 de Dezembro de 2010, às 18:00 h (HS=2.18 m, T = 13.13 s, DIR= 354°) e no dia 22 de Fevereiro às 12 horas (HS=1.67 m, T = 11.62 s, DIR= 356°).

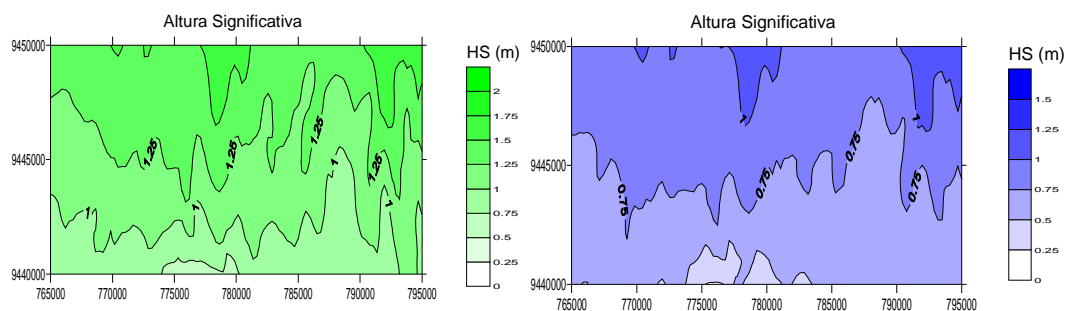


Figura 9. Resultados do SWAN para o dia 26 de Dezembro de 2010, às 18:00 h (HS=2.18 m, T = 13.13 s, DIR= 354°) e para o dia 22 de Fevereiro às 12 horas (HS=1.67 m, T = 11.62 s, DIR= 356°).

Como pode ser facilmente observado nesta figura, há alteração da altura de onda significativa à medida que a onda se propaga em direcção à praia, para qualquer dos períodos em estudo, que é o resultado da refacção e difracção das ondas.

5.3 Comparação entre os resultados numéricos e valores medidos

Da Figura 14 à **Error! Reference source not found.6** apresenta-se os valores numéricos de HS, Tmed e DIR_med, obtidas com o modelo SWAN, bem como das respectivas medições no período de 20 a 27 de Dezembro de 2010, para o ponto PT1.

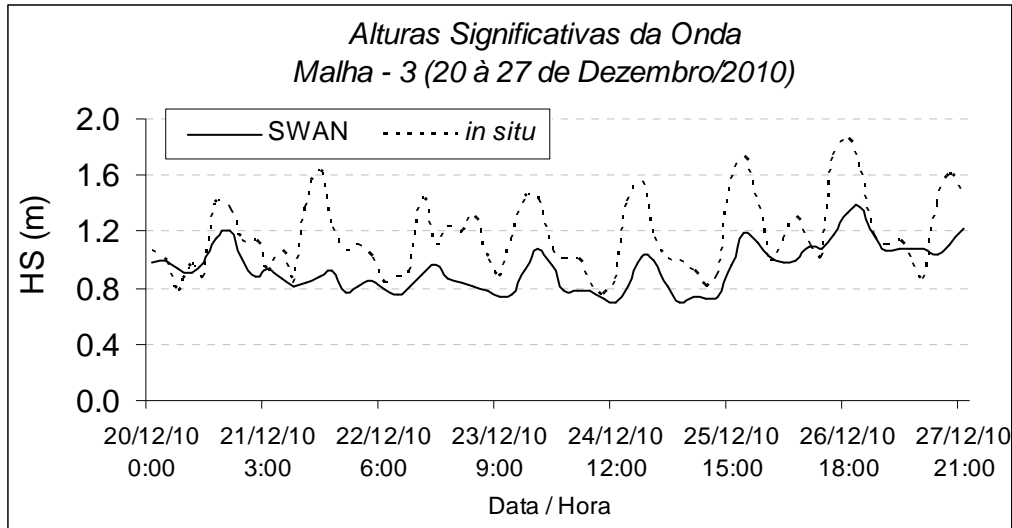


Figura 14 – Comparação dos resultados da altura significativa obtidos com o SWAN com as medições efectuadas no instrumento PT1 no período de 20 a 27 de Dezembro de 2010.

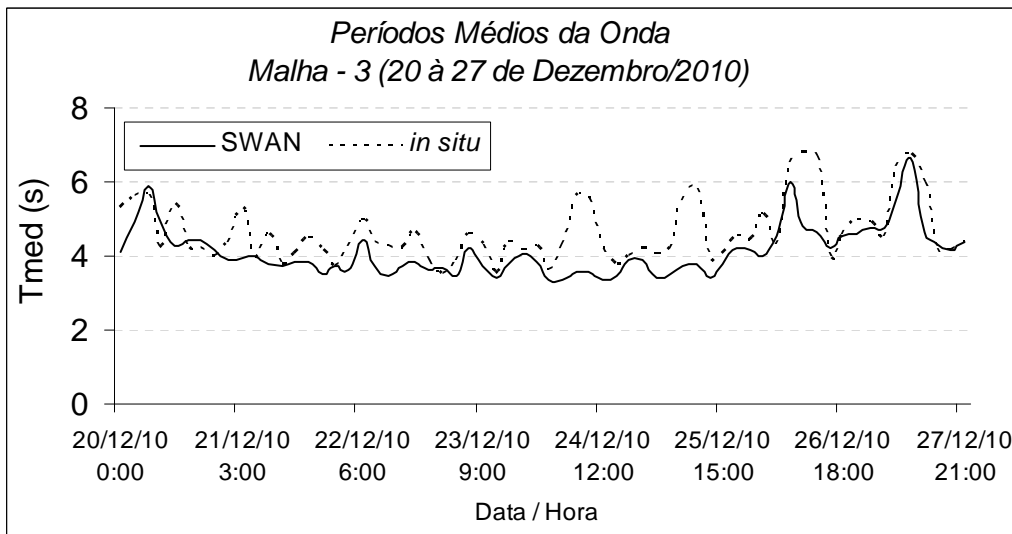


Figura 105 – Comparação dos resultados do período médio obtidos com o SWAN com as medições efectuadas no instrumento PT1, no período de 20 a 27 de Dezembro de 2010.

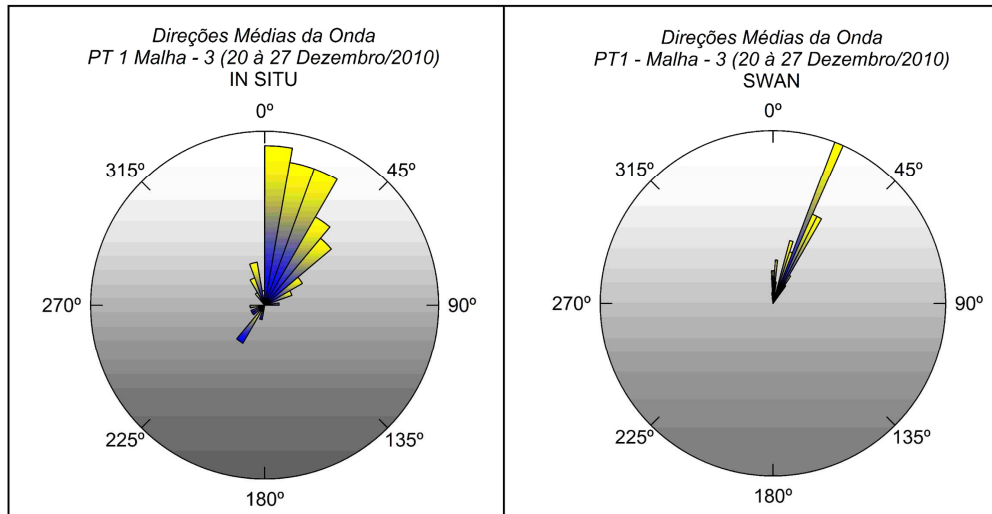


Figura 116 – Comparação dos resultados da direcção média de pico obtidos com o SWAN com as medições efectuadas no instrumento PT1, no período de 20 a 27 de Dezembro de 2010.

Da Figura 17 à **Error! Reference source not found.9** apresenta-se os valores numéricos de HS, Tmed e DIR_med, obtidas com o modelo SWAN, bem como das respectivas medições no período de 15 a 22 de Fevereiro de 2011, para o ponto PT2.

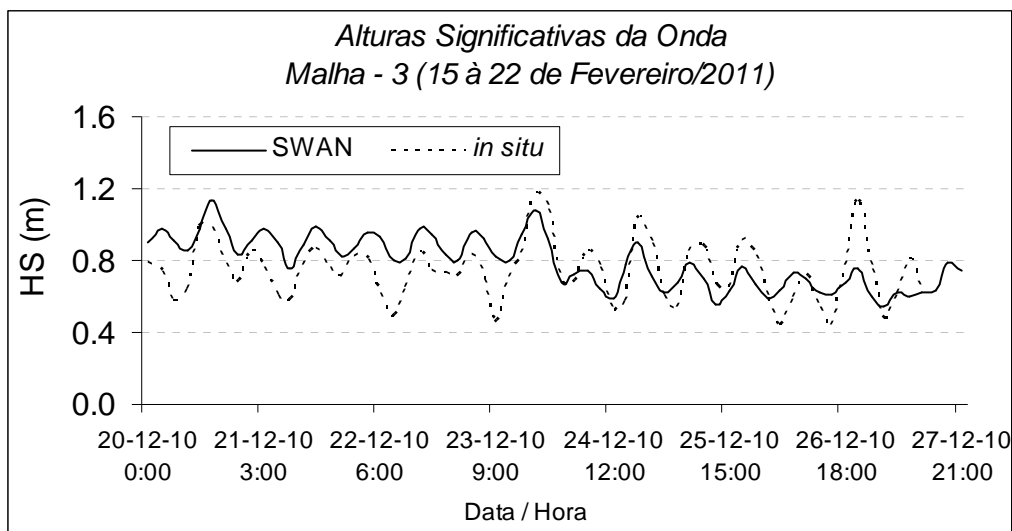


Figura 17 – Comparação dos resultados da altura significativa obtidos com o SWAN com as medições efectuadas no instrumento PT2, no período de 15 a 22 de Fevereiro de 2011.

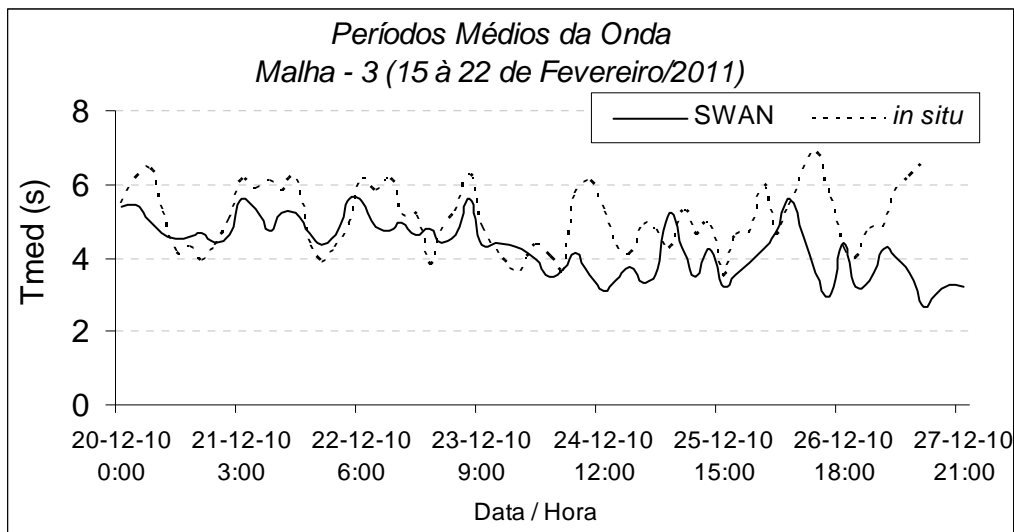


Figura 18 – Comparação dos resultados do período médio obtidos com o SWAN com as medições efectuadas no instrumento PT2, no período de 15 a 22 de Fevereiro de 2011.

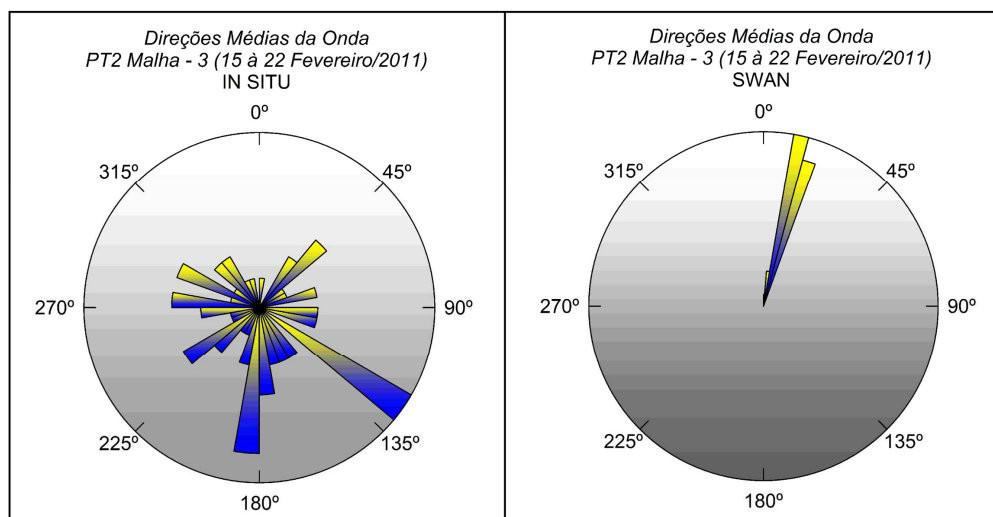


Figura 129 – Comparação dos resultados da direcção média de pico obtidos com o SWAN com as medições efectuadas no instrumento PT2, no período de 15 a 22 de Fevereiro de 2011.

Das figuras acima, pode constatar-se que

- Para o ponto PT1, o andamento geral e a ordem de grandeza dos valores de altura de onda significativa, período médio e direcção média calculados pelo modelo numérico SWAN são muito semelhantes aos correspondentes valores medidos, para o período em análise. Em especial, o modelo SWAN simula bastante bem os valores de altura e período de onda, embora os valores sejam, em geral, inferiores e mais alisados do que os medidos. Em termos de direcção da onda, verifica-se que o modelo simula razoavelmente a direcção média das ondas mas não conduz a uma gama tão alargada como a dos dados medidos.
- Para o ponto PT2, também o andamento geral e a ordem de grandeza dos valores de altura de onda significativa e período médio calculados pelo modelo numérico SWAN são muito semelhantes aos correspondentes dos valores medidos, especialmente no caso dos períodos médios. Quanto aos valores da altura de onda, verifica-se que os valores

numéricos são ligeiramente superiores aos medidos até ao dia 23-02-2011, passando a ser muito próximos dos medidos a partir daí. Verifica-se em geral um alisamento dos valores numéricos face aos medidos. Tal pode ser consequência da imposição de ventos constantes na zona em estudo, o que não acontece na realidade. No caso da direcção da onda, os valores numéricos diferem dos valores medidos, a gama do modelo é significativamente mais estreita do que a observada nos dados. Note-se que o PT2 está mais próximo da costa sujeito a ventos locais e a correntes que não foram incluídos nas simulações numéricas.

- Além disso, em geral, os valores numéricos e medidos apresentam uma melhor concordância para o ponto PT1, uma vez que se encontra em águas mais profundas e mais ao largo, do que para PT2;
- As diferenças encontradas podem ser explicadas pelos seguintes aspectos:
 - Os cálculos foram efectuados considerando valores de velocidade e direcção de vento constantes em todo o domínio de cálculo e para cada intervalo de tempo de três horas;
 - Os valores de vento considerados dizem respeito a valores obtidos na estação Meteorológica de Macau situada em terra e não valores obtidos na zona marítima em estudo;
 - Não se consideraram correntes nas simulações numéricas;
 - Não se efectuou qualquer estudo de sensibilidade quanto aos parâmetros do modelo relacionados com o atrito de fundo ou com a rebentação das ondas, por exemplo. Aqui neste trabalho consideraram-se os valores sugeridos no manual do SWAN.

Note-se que as simplificações admitidas resultam da falta de informação quanto aos ventos e correntes características da zona em estudo.

6 CONCLUSÕES

Nesta comunicação, descreveram-se as medições da agitação marítima e a aplicação efectuada com o modelo SWAN na zona marítima entre os municípios de Macau e Guamaré, para diferentes condições de agitação incidente, com vista a caracterizar o padrão de ondas geradas pelo vento.

O modelo SWAN é assim aplicado na propagação de várias condições de agitação incidente desde o largo até junto à costa da área adjacente ao estuário de Diogo Lopes. Mais concretamente, para alguns dos dias em que se efetuaram medições e considerando as condições de agitação marítima ao largo fornecidas pelo modelo de previsão WAVEWATCH III (Tolman, 1999) é executado o modelo SWAN e obtidas as características da agitação marítima neste seguimento do litoral. Seguidamente, efectuou-se a comparação dos resultados numéricos com os dados medidos nos instrumentos colocados para o efeito em profundidades de entre 4 a 12 m em momentos de regime de meso-marés (marés semi-diurnas em fase de sizígia).

Da comparação entre dados medidos e simulações numéricas com o SWAN, pode-se concluir que o modelo SWAN é um modelo que conseguiu reproduzir bastante bem o andamento geral e a ordem de grandeza das alturas significativas e períodos de onda ao longo



dos períodos em estudo, para qualquer dos pontos em estudo mas especialmente para o ponto PT1, que se situa mais ao largo. Para estas grandezas, os valores numéricos são em geral mais alisados e na maioria dos casos inferiores aos medidos. Em relação à direcção de onda, o modelo apresenta maiores dificuldades na simulação dos valores medidos. O modelo não consegue simular a gama vasta de direcções presente nos dados medidos, especialmente para o ponto PT2. O modelo conduz a resultados numéricos mais próximos dos medidos para o ponto em maiores profundidades, PT1, do que para o de menor, PT2, onde outros efeitos de correntes e ventos locais, variam mais significativamente.

As diferenças encontradas entre resultados numéricos e medidos, podem ser devidas às simplificações que tiveram de ser admitidas nos cálculos efectuados, por falta de informação, nomeadamente no que diz respeito aos ventos (ventos constantes em todo o domínio computacional e baseados nos valores obtidos na Estação Meteorológica de Macau), e às correntes (não se incluíram nos cálculos as correntes). Assim, a caracterização dos campos de ventos e de correntes na zona e sua inclusão nas simulações numéricas ao longo dos períodos de simulação, constitui trabalho futuro.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem a fonte financiadora brasileira CAPES, pela concessão da bolsa através da Rede Amigos Boussinesq, às equipas de trabalhos da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN e do Laboratório de Engenharia Civil de Portugal - LNEC.

Agradecem ainda à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento concedido através dos projectos PTDC/ECM/73145, PTDC/AMB/67450/2006 e PTDC/ECM/67411/2006 e aos projectos cooperativos HIDROSEMA e MOLECO, da Rede de Monitoramento: REDE5-PETROMAR/CTPETRO-FINEP/PETROBRAS/CNPq.

BIBLIOGRAFIA

- ANP. 2010. Agência Nacional do Petróleo. Boletim Mensal da Produção de Petróleo e Gás Natural.
- BOOIJ, N.; RIS, R.C.; HOLTHUIJSEN, L.H. 1999. A Third-generation Wave Model for Coastal Regions, Part I, Model Description and Validation. *J. Geophysical Research*, 104 (C4), pp. 7649-7666.
- BOORI. M.S.; AMARO, V.E. 2010. Land use change detection for environmental management: using multi-temporal satellite data in the Apodi Valley of northeastern Brazil. *Applied GIS*, v. 6, p.1-15.
- CHAVES M.S. 2005. Dinâmica costeira da área Macau-Serra, Litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte. Tese de Doutorado. Geodinâmica e Geofísica – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 97p.
- DHN. 2010. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Bases de dados da tábua de maré obtidas para os meses de Outubro a Dezembro de 2010.
- FORTES, C.J.E.M.; PINHEIRO, L.; PALHA, A. 2007. O pacote SOPRO: Evoluções recentes. in *Anais do V Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Lisboa, Out. 2007, 1.
- GOMES, M.P. 2009. Aquisição, processamento e análise de dados de sísmica de alta resolução na plataforma continental norte do Rio Grande do Norte: Vale inciso do Rio



- Açú. Dissertação de Mestrado. Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 125p.
- GRIGIO, A.M., AMARO, V.E., VITAL, H., DIODATO, M.A. 2005. A method for coastline evolution analysis using GIS and Remote sensing - A case study from the Guamare city, Northeast Brazil. *Journal of Coastal Research, Florida, USA*, v. 42, p. 412-421.
- HASSELMANN, K.; BARNETT, T.P.; BOUWS, E.; CARLSON, H.; CARTWRIGHT, D.E.; ENKE, K.; EWING, J.A.; GIENAPP, H.; HASSELMANN, D.E.; KRUSEMAN, P.; MEERBURG, A.; MILLER, P.; OLBERS, D.J.; RICHTER, K.; SELL, W.; WALDEN, H. 1973. Measurements of wind wave-growth and swell decay during the Joint _North Sea Wave Project (JONSWAP), *Dtsch Hydrogr. Z. Suppl.* 12 (A8), 1-95.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. 2010. Base de dados das estações meteorológica.
- KAHMA, K.; HAUSER, D.; KROGSTAD, H. E.; LEHNER, S.; MONBALIU, J.; WYATT, L. R. 2005. Measuring and analysing directional spectra of ocean waves. *COST Action 714, EUR 21367, Brussels.*
- LIMA, Z.M.C.; ALVES, A.L.; AMARO, V.E.; VITAL, H. 2002. Coastline Evolution of the Galinhos Spit (NE Brazil) Using Air Photography And LANDSAT TM Images. *Revista Pesquisas em Geociências, Ed. UFRGS, RS.* 28 (2).
- LIMA, Z.M.C.; VITAL, H.; TABOSA, W.F. 2006. Morphodynamic variability of the Galinhos Spit, NE Brazil. *Journal of Coastal Research, Special Issue 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium. Journal of Coastal Research, v. 39, p. 598-601.*
- MATOS, M.F.A.; FORTES, C.J.E.M.; AMARO, V.E.; SCUDELARI, A.C.; NEVES, C.F. 2011. Análise de dados a partir de métodos in situ no Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte. in *Anais do VI Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, Boa Vista, Cabo Verde, APRH, p.73.
- NASCIMENTO, M.C. 2009. A erosão costeira e sua influência sobre a atividade petrolífera: alternativas sustentáveis na mitigação de impactos ambientais. Dissertação de Mestrado. Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 229p.
- PEDERSEN, T.; SIEGEL, E.; WOOD, J. 2007. Directional wave measurements from a subsurface buoy with an acoustic wave and current profile (AWAC). *MIS*, 0-933957-35-1, 10p.
- SAMPAIO, M.J.R.T. 2008. Aplicação do modelo Swan na caracterização da agitação marítima na zona adjacente a Pinheiro da Cruz. Dissertação de Mestrado. Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal. 66p.
- SOUTO, M.V.S.; GRIGIO, A.M.; CASTRO, A.F. AMARO, V.E. 2006. Multitemporal analysis of geoenvironmental elements of the coastal dynamics of the region of the Ponta do Tubarão, city of Macau/RN, on the basis is remote sensing products and integration in GIS. *Journal of Coastal Research, EUA. Journal of Coastal Research, Special Issue 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium, Itajaí, SC – Brazil).*
- SILVEIRA, I.M. 2002. Monitoramento Geo-ambiental da Região Costeira do Município de Guamaré-RN. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 115p.
- TABOSA, W. F. 2002. Monitoramento costeiro das praias de São Bento do Norte e Caiçara do Norte – RN: Implicações para o Pólo Petrolífero de Guamaré”. Dissertação de Mestrado, Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 112p.
- TABOSA, W.F.; VITAL, H. 2004. Interpretações preliminares para dados hidrodinâmicos da plataforma interna adjacente a São Bento do Norte. in *Anais do Congresso Brasileiro de Oceanografia, Itajaí-SC.* p436.
- TOLMAN, H.L. 1999. User Manual and System Documentation of WAVEWATCH-III Version 1.18, NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 166, 110 pp.