



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**PROPAGAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA DO  
LARGO PARA A COSTA DE MAPUTO.  
APLICAÇÃO AO TRANSPORTE  
LONGITUDINAL DE SEDIMENTOS.**

**CRISTINA NHELETI AMÉRICO VIOLA**

**SUPERVISORES: ENG.º. JAIME PALALANE (U.E.M)  
DR. MANEL GRIFOLL (U.P.C BARCELONA TECH)**

**MAPUTO, JULHO 2012**

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

PROPAGAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA DO LARGO PARA A  
COSTA DE MAPUTO. APLICAÇÃO AO TRANSPORTE LONGITUDI-  
NAL DE SEDIMENTOS.

CRISTINA NHELETI AMÉRICO VIOLA

UMA PARCERIA ENTRE:



&



E COM O APOIO DE:



&



SUPERVISORES: ENGº. JAIME PALALANE (U.E.M)  
DR. MANEL GRIFOLL (U.P.C BARCELONA TECH)

MAPUTO, JULHO 2012

Propagação da Agitação Marítima do Largo para à Costa De Maputo.

Aplicação ao Transporte Longitudinal de Sedimentos.

Cristina Viola

---

## **DEDICATÓRIA**

“Pai, a semente que lançaste germinou e este é um dos seus frutos. Espero que onde quer que estejas também o possas saborear!”

Dedico este trabalho a minha família. Especialmente aos meus pais e de modo muito particular ao meu pai, Pio Américo Viola, que mesmo com todas as suas dificuldades sempre zelou pela educação e formação dos seus filhos.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus pelas graças que diariamente me concede e por ter colocado a minha disposição um batalhão de anjos que muito pacientemente me acompanharam no decorrer deste trabalho, directa ou indirectamente;

A minha família, que sempre se engajou na minha formação como ser humano e é responsável por tudo aquilo que hoje sou;

A FE/UEM, muito em especial ao Eng<sup>o</sup>. Jaime Palalane pelas oportunidades de aprendizagem que me concedeu e pela atenção dedicada, provendo-me de conhecimento e orientações para a elaboração deste trabalho;

A AECID e ao CCD/UPC que permitiram que a minha viagem se materializasse, pela oportunidade de aprender e pela troca de experiências em que pude participar;

Ao LIM/UPC particularmente ao Eng<sup>o</sup>. Tiago Oliveira e ao Dr. Manel Grifoll pela paciência e dedicação dispensadas a este trabalho sem nunca hesitarem em ensinar e criticar, a Elena Pallares e a Mercé Casas pelos ensinamentos transmitidos para e pela disposição permanente para a compreensão do modelo SWAN e ao Dr. Manuel Espino pelo acompanhamento dispensado neste projecto;

Ao casal Ronda por me ter adoptado e assumido a responsabilidade pela minha formação, apoiando-me, orientando-me e acreditando em mim sem nunca mostrar desânimo;

Aos meus amigos Pedro Nhanala, Patrícia Baila, Santos Nhandolo, Dércio Langa que muito me apoiaram e dedicaram sempre uma parcela do seu tempo para que mesmo longe não me sentisse só, pela amizade e pela hospitalidade de Tacilta Nhampossa, Piedade João, Elias Baptista, Loredana Diaz, Betsabe Gallardo, Eva Solé, Celina Maragoto e Mercedes Vicente.

## RESUMO

**Título:** Propagação da Agitação Marítima Do Largo para à Costa de Maputo. Aplicação ao Transporte de Sedimentos

**Autora:** Cristina Nhelete Américo Viola

**Supervisores:** Jaime Palalane/Manel Grifoll

A zona costeira de Maputo apresenta grande diversidade natural caracterizada pela existência de mangais, bancos de corais submarinos, pequenas ilhas e arquipélagos, entre outros. No entanto, encontra-se susceptível a degradação pela erosão, perda dos mangais, bem como à diminuição das dunas. Nos últimos anos, tem-se verificado um esforço no sentido de reduzir tal vulnerabilidade, fornecendo informação resultante de estudos que contribui para a mitigar estes riscos.

O presente trabalho caracteriza a agitação marítima nas proximidades da região costeira de Maputo. Deste modo pretende-se contribuir para o melhor conhecimento de um dos principais agentes físicos forçadores da situação de vulnerabilidade verificada na zona de estudo.

Esta caracterização foi feita por meio de propagação da agitação marítima do largo para a Costa usando numa primeira fase a Teoria Linear de Propagação de Ondas, e numa segunda fase o modelo de propagação SWAN, de uma série de dados de 13 anos proveniente do modelo numérico NWW3.

A propagação Linear marítima foi feita para uma região na Península de Machangulo para o clima médio de agitação, a partir das características da altura morfológica.

As ondas do clima médio e ondas do clima extremo foram também propagadas com o modelo SWAN. Tendo sido feitos testes de sensibilidade para estudar a influência nos resultados de parâmetros como o vento, as marés, tipo de espectro representativo, e da resolução da malha de cálculo.

A partir dos resultados da propagação linear calculou-se o transporte longitudinal de sedimentos por acção da agitação marítima para um trecho da península de Machangulo considerando a fórmula de CERC.

Verificou-se na propagação linear, para o ponto em estudo que as ondas ao largo provenientes do Sul apresentam os valores de alturas de onda mais pequenos no ponto de rebentação. Ainda na propagação linear se pôde notar que as ondas com períodos menores rebentam em águas intermédias e que as características das ondas modificam-se mais quanto maior for o seu período.

Propagação da Agitação Marítima do Largo para à Costa De Maputo.

Aplicação ao Transporte Longitudinal de Sedimentos.

Cristina Viola

---

Com a propagação com o SWAN concluiu-se que as ilhas de Inhaca, Xefina, Elefantes e as penínsulas de Macaneta e Machangulo existentes na Baía de Maputo funcionam como uma protecção natural para a costa, de modo que as alturas significativas das ondas nesta região encontram-se entre 0 – 0.5 m.

Do cálculo da taxa potencial de transporte longitudinal de sedimentos, pôde-se verificar que na região em estudo o transporte dá-se na sua maioria para a direcção Norte, uma vez que as direcções de agitação ao largo mais frequentes localizam-se entre Este e Sudoeste.

**Palavras – Chaves:** Costa de Maputo. Propagação da Agitação Marítima. Modelo SWAN. Transporte Longitudinal de Sedimentos.

## **ABSTRACT**

**Title:** Sea Wave Propagation from Offshore Maputo Coast. Application to the Sediment Transport.

**Author:** Cristina Nhelete Américo Viola

**Supervisors:** Jaime Palalane/Manel Grifoll

The coastal area of Maputo has a large natural diversity characterized by the existence of mangroves, coral reefs submarines, small islands and archipelagos, among others. However, it is susceptible to degradation by erosion, mangrove loss and the decrease of the dunes. Recently there has been an effort to reduce this vulnerability, supplying information derived from studies which contributes to reduce these risks.

This study aims to characterize the wave climate near the coastal region of Maputo. Thus, it intends to contribute to a better understanding of one of the main agents of physical vulnerability forcing found in the study area.

This characterization was performed by propagation of a time-series of 13 years from the numerical model NWW3 using the Theory of Linear Wave Propagation and the second stage the propagation model SWAN.

The linear propagation was carried out using the characteristics of the morphological wave by the averaged wave climate to an area in the Machangulo Peninsula.

The waves of the averaged and the extreme climate were also propagated using SWAN model, starting with a series of sensitivity tests to study the influence on the results of parameters such as wind, tide, type of representative spectra, and the resolution of the mesh calculation.

The potential rate of longitudinal transport of sediments by the action of sea waves was evaluated using the results of the linear propagation and the CERC formula.

From linear propagation the waves from the South present the smallest values of wave heights at the breaking point. Although in the linear propagation can be noted that the waves with small periods break in intermediate water and wave characteristics change as more as higher is the period.

For wave propagation with SWAN was concluded that the Maputo Bay acts as a natural protection of the coast of Maputo city, so the significant wave height in this region is small (less than 0.5 m).

From the calculation of the potential rate of longitudinal transport of sediment, was concluded that in the region under study the transport takes place mostly in the North

Propagação da Agitação Marítima do Largo para à Costa De Maputo.

Aplicação ao Transporte Longitudinal de Sedimentos.

Cristina Viola

---

direction, because the frequently directions of wave propagated are between the East and Southwest.

**Key - Words:** Maputo Coastal Area. Wave Propagation. SWAN model. Longitudinal Sediment Transport.



## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Objectivos.....	1
1.2. Metodologia .....	1
2. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS .....	3
2.1. Geração e Propagação de ondas.....	3
2.1.1. Geração de ondas pelo Vento .....	3
2.1.2. Método do SPM .....	4
2.1.2.3. Duração do vento e profundidade da água.....	7
2.1.3. Empolamento .....	10
2.1.4. Refracção.....	12
2.1.5. Rebentação.....	15
2.2. Marés.....	19
2.2.1. Maré Astronómica .....	19
2.2.2. Maré Meteorológica .....	21
2.3. O Modelo SWAN .....	22
2.3.1. Dados de entrada.....	23
2.3.2. Processos Físicos e Esquemas Numéricos .....	25
2.3.3. Dados de saída.....	26
2.4. Transporte longitudinal de sedimentos por acção das ondas.....	26
2.4.1. Fórmula de CERC (USACE, 1984) .....	26
2.4.2. Fórmula de Kamphuis (1991).....	28
2.4.3. Fórmula de Van Rijn (2001) .....	29
3. DESCRIÇÃO FÍSICA DA ÁREA EM ESTUDO .....	32
3.1. Localização.....	32
3.2. Clima .....	32
3.3. Geomorfologia .....	33
Continuação da legenda.....	34
3.4. Demografia e Actividades Sócio Económicas .....	34
3.5. Caracterização da agitação marítima na Baía de Maputo .....	35
3.5.1. Caracterização da agitação marítima ao largo da Baía de Maputo.....	35
3.5.2. Caracterização da agitação marítima no interior da Baía de Maputo .....	37

3.6. Marés.....	38
4. PROPAGAÇÃO SEGUNDO A TEORIA LINEAR .....	40
5. PROPAGAÇÃO COM O MODELO SWAN .....	46
6. AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE LONGITUDINAL PELA FÓRMULA DE CERC ...	55
7. CONCLUSÕES .....	58
8. FUTURAS LINHAS DE TRABALHO .....	60
BIBLIOGRAFIA.....	61
- Referências Bibliográficas .....	61
- Outra Bibliografia Consultada .....	62

## **ANEXOS**

**ANEXO 1:** Propagação Linear

**ANEXO 2:** Análise do clima médio no modelo SWAN

**ANEXO 3:** Análise do clima médio incluindo o vento no modelo SWAN

**ANEXO 4:** Análise do clima médio incluindo o efeito das marés no modelo SWAN

**ANEXO 5:** Análise do clima médio variando o espectro no modelo SWAN

**ANEXO 6:** Análise do clima extremo no modelo SWAN

## **LISTA DE SÍMBOLOS**

**AECID** – Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo

**BSBT** – Backward Space, Backward Time

**CCD** – Centre de Cooperació per al Desenvolupament

**CERC** – Coastal Engineering Research Center

**FE** – Faculdade de Engenharia

**GEBCO** – General Bathymetric Charts of the Oceans

**INAHINA** – Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação

**INE** – Instituto Nacional de Estatística

**ISRIC** - World Soil Information Database

**LIM** – Laboratori d’Enginyeria Marítima

**MPDC** – Maputo Port Development Company

**NOAA** – National Oceanic and Atmospheric Administration

**NWW3** – NOAA Wave Watch III

**PM** – Pierson e Moskowitz

**S&L** – Stelling and Leendertse

**SORDUP** – Second ORDER, UPwind

**SPM** – Shore Protection Manual

**SWAN** – Simulating WAVes Nearshore

**UEM** – Universidade Eduardo Mondlane

**UPC** – Universitat Politècnica de Catalunya

**USACE** – United States Army Corps of Engineer

**WAM** – WAVes Model

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Dependência da agitação marítima pela força, sua duração e <i>fetch</i> do vento (Fonte: Komar 1983).....	3
Figura 2.2: Traçado das radiais para o cálculo do <i>Fetch</i> segundo o SPM (Fonte: Liu e Frigaard 2001).....	4
Figura 2.3: Razão entre velocidade do vento sobre o mar ( $U_w$ ) e velocidade do vento no continente ( $U_L$ ) (Fonte: Liu e Frigaard 2001). ....	6
Figura 2.4: Factor $R_T$ para diferenças de temperatura ar-mar (Fonte: Liu e Frigaard 2001). ....	7
Figura 2.5: Fluxograma do procedimento no método do SPM para uma duração limitada. ....	10
Figura 2.6: Representação esquemática do fenómeno de empolamento (Fonte: Marco 2005). ....	11
Figura 2.7: Fenómeno de Refracção (Fonte: ufjr 2012).....	13
Figura 2.8: Parâmetros aplicados na Lei de Snell (Fonte: Andersen e Frigaard 2007). ....	14
Figura 2.9: Fotos de alguns tipos de rebentação que ocorrem na natureza (Fonte: EurOtop Overtopping Manual 2007). ....	18
Figura 2.10: Esquema dos diferentes tipos de Rebentação (Fonte: Andersen e Frigaard 2007). ....	19
Figura 2.11: Esquema referente ao fenómeno de Maré (Fonte: astropt 2012).....	20
Figura 2.12: Maré Meteorológica (Fonte: OpenHazards 2012) ....	21
Figura 3.1: Limites e principais acidentes na Baía de Maputo (Fonte: Google earth)....	32
Figura 3.2: Mapa ilustrativo da geomorfologia da Baía de Maputo (Fonte: ISRIC 2012). ....	33
Figura 3.3: Exemplos de actividades económicas na região costeira de Maputo.....	35
Figura 3.4: Rosas de Ondulação para o largo da Baía de Maputo (Fonte: Guiloviça 2011). ....	37
Figura 4.1: Ponto de onde se obtiveram os dados de agitação marítima provenientes do modelo NWW3 (Fonte: Google earth). ....	40
Figura 4.2: Zona de estudo da propagação Linear de ondas (Fonte: Google earth). ....	42
Figura 4.3: Ângulo $\alpha$ medido na zona des estudo (Fonte: Google earth). ....	43
Figura 4.4: Frequência das direcções da propagação linear. ....	44

Figura 5.1: Malhas de cálculo para a propagação em SWAN (Fonte: Google earth). ...	46
Figura 5.2: Malhas de cálculo e pontos considerados no estudo (Fonte: Google earth). .....	47
Figura 5.3: Batimetria obtida pela GEBCO utilizada na propagação com SWAN.....	48
Figura 5.4: Localização do ponto de estudo (Fonte: Google earth, 2012). ....	49
Figura 5.5: Imagem produzida para escolha do ponto em estudo. ....	49
Figura 5.6: Exemplo dos resultados das simulações com o modelo SWAN.....	50
Figura 5.7: Frequências das direcções consideradas na propagação com o modelo SWAN.....	52

## LISTA DE TABELAS

Figura 3.1: Limites e principais acidentes na Baía de Maputo (Fonte: Google earth)....	32
Figura 3.2: Mapa ilustrativo da geomorfologia da Baía de Maputo (Fonte: ISRIC 2012). .....	33
Figura 3.3: Exemplos de actividades económicas na região costeira de Maputo.....	35
Figura 3.4: Rosas de Ondulação para o largo da Baía de Maputo (Fonte: Guiloviça 2011). .....	37
Tabela 4.1: Frequências dos períodos das ondas em função das direcções de propagação.....	41
Tabela 4.2: Alturas morfológicas calculadas para o clima médio. ....	41
Tabela 4.3: $H_s$ (m) para $T_p$ e direcções ao largo consideradas na propagação Linear. .	42
Tabela 4.4: $H_b$ (m) para $T_p$ (s) nas direcções consideradas ao largo na propagação Linear.....	43
Tabela 5.1: Resultados das características das ondas no ponto P2 em função da resolução das malhas.....	47
Tabela 5.2: Características das ondas ao largo do clima médio propagadas com o modelo SWAN. ....	50
Tabela 5.3: Características do clima médio no ponto de estudo. ....	51
Tabela 5.4: Características da agitação marítima com a inclusão do vento para o ponto em estudo. ....	52
Tabela 5.5: Características da agitação marítima propagada considerando o efeito das marés.....	53
Tabela 5.6: Características da agitação marítima propagada considerando o espectro de frequência de Pierson – Moskowitz. ....	53
Tabela 5.7: Características das ondas do clima extremo para propagação com o modelo SWAN. ....	53
Tabela 5.8: Características da agitação marítima do clima extremo no ponto de estudo. .....	54
Tabela 6 1: Taxa potencial de sedimento transportado longitudinalmente ( $m^3/ano$ ) na região em estudo. ....	55
Tabela 6.2: Transporte longitudinal potencial pela fórmula de CERC. ....	56
Tabela 6.3: Transporte longitudinal potencial pela fórmula de CERC para a Praia de Escuadrón, Bío-bío, Chile.....	56

## 1. INTRODUÇÃO

A zona costeira de Maputo apresenta uma grande diversidade natural caracterizada pela ocorrência de mangais, bancos de corais submarinos, pequenas ilhas e arquipélagos, entre outros. Deste modo, aparece como elemento fundamental na economia regional do País, pois, para além desta diversidade, destacam-se nela actividades económicas, turísticas e ainda culturais, destacando-se também uma elevada densidade populacional.

No entanto, ela encontra-se susceptível a degradação pela erosão, perda dos mangais, bem como a diminuição das dunas e parte desta degradação deve-se a processos relacionados com a agitação marítima. Daí surge a necessidade de conhecer o comportamento da agitação marítima na região costeira de Maputo.

Nos últimos anos, tem-se verificado um esforço no sentido de reduzir esta vulnerabilidade, que se manifesta na elaboração de estudos que tentam contribuir para mitigar este risco. Assim, este estudo apresenta-se como mais uma ferramenta que pretende contribuir para a compreensão e redução da vulnerabilidade da zona costeira de Maputo.

### 1.1. Objectivos

O objectivo fundamental do presente trabalho é caracterizar a agitação marítima na região adjacente à Costa de Maputo.

Para alcançar este objectivo foram identificados os seguintes **objectivos específicos**:

- Identificar os dados de hidrodinâmica marítima disponíveis para a Costa de Moçambique, para a região costeira de Maputo, podendo incluir dados de clima extremo e de clima médio, características da maré, bem como do regime do vento como agente impulsor da ondulação;
- Modelar e propagar as características da agitação marítima na costa de Maputo analisando os processos de geração e propagação (refracção, rebentação, etc.) a partir da informação do clima de ondulação identificada;
- Avaliar o transporte longitudinal de sedimentos por acção da agitação marítima num trecho da costa de Maputo.

### 1.2. Metodologia

Para se proceder a este estudo de forma coerente adoptou-se a seguinte metodologia:

- Análise da bibliografia sobre geração e processos de propagação do largo à costa, assim como a interacção das ondas com a costa;



- Caracterização da agitação marítima a partir de estudos e projectos marítimos efectuados e implementados em Maputo;
- Simulação dos processos de propagação de ondas utilizando Teoria Linear;
- Implementação e simulação dos processos de geração e propagação de ondas utilizando o modelo numérico SWAN;
- Teste de sensibilidade dos diferentes parâmetros existentes no modelo SWAN que afectam a agitação marítima, como a resolução das malhas de cálculo, a variação do tipo de espectro de frequência;
- Avaliação do transporte longitudinal de sedimentos por acção da agitação marítima com a formulação de CERC;
- Análise crítica dos resultados obtidos, considerando uma possível comparação com os resultados de outros estudos e projectos marítimos efectuados para a região costeira de Maputo;
- Traçado de futuras linhas de investigação que permitem aperfeiçoar o estudo da agitação marítima na região costeira de Maputo.

## 2. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

### 2.1. Geração e Propagação de ondas

As ondas que geralmente chegam à nossa costa seguem uma dinâmica que começa muito distante do litoral. Esta dinâmica inicia com a geração das ondas e envolve a sua propagação que por sua vez envolve também vários processos responsáveis pelas características com que elas chegam e interagem com a costa.

#### 2.1.1. Geração de ondas pelo Vento

O vento é o principal responsável pela geração da agitação marítima quer ao largo, assim como nas proximidades da costa. O vento é também um grande interveniente na formação de dunas costeiras e no transporte de sedimentos da costa e de dunas tendo assim um papel relevante na modelação costeira (Coelho 2005).

O processo de geração de ondas dá-se pela transferência de energia cinética do vento para a superfície do mar. Deste modo, conhecendo-se o comportamento do vento numa região próxima do local de interesse no mar, torna-se possível caracterizar a agitação marítima cujas principais características dependem dos factores seguintes:

- A força do vento;
- A duração do vento;
- O *fetch* (comprimento/extensão onde actua o vento).

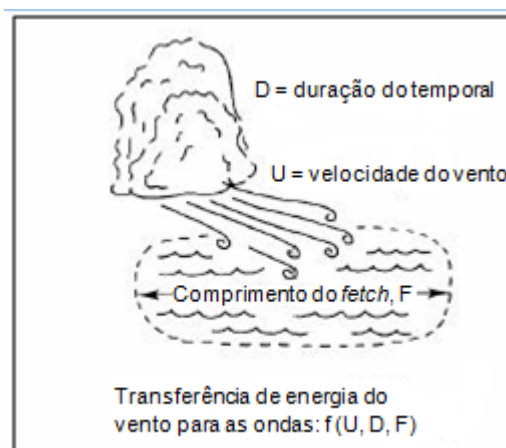


Figura 2.1: Dependência da agitação marítima pela força, sua duração e *fetch* do vento (Fonte: Komar 1983).

Esta caracterização da agitação marítima a partir de dados do vento pode ser feita mediante vários métodos, dentre os mais divulgados:

- Método do SPM (*Shore Protection Manual* 1984 citado em Liu e Frigaard 2001);
- Espectro de PM (Pierson & Moskowitz 1964 citado em Liu e Frigaard 2001).

Na secção seguinte desenvolve-se o Método do SPM.

### 2.1.2. Método do SPM

O Método do *Shore Protection Manual* envolve quatro parâmetros, nomeadamente: o *fetch*, o factor de pressão do vento, a duração do vento, e a profundidade da água. A influência destes parâmetros é descrita de forma sumaria nos parágrafos seguintes.

#### 2.1.2.1. Fetch

O Método SPM sugere que se trace nove radiais em intervalos de três graus desde o ponto de interesse até a primeira intersecção com o litoral oposto a esse ponto. Assim, traça-se em primeiro lugar a radial perpendicular ao ponto de interesse, que deve ser a radial central. A partir desta radial, traçam-se quatro para um lado e mais quatro para o outro, intervaladas em três graus. O *fetch*, expresso em metros (m), é a média dos comprimentos das radiais traçadas. A figura 2.2 ilustra o procedimento a ter em conta no traçado das radiais para obter o *fetch*.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^9 F_i}{9} \quad (\text{Equação 2.1})$$

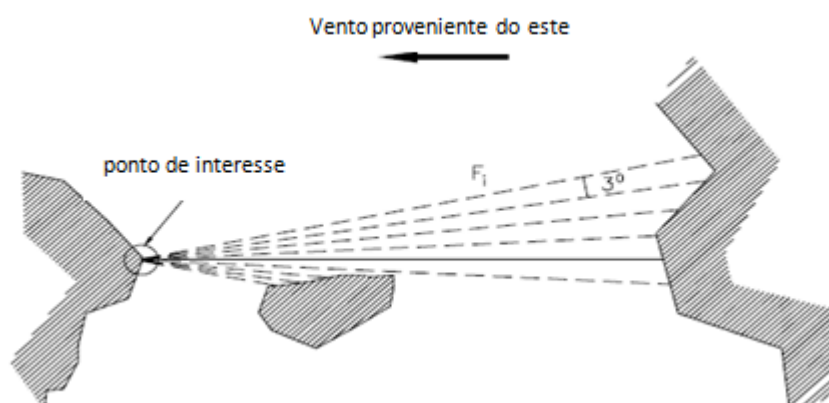


Figura 2.2: Traçado das radiais para o cálculo do *Fetch* segundo o SPM (Fonte: Liu e Frigaard 2001).

### 2.1.2.2. Factor da pressão do vento

A correcta estimação do perfil da velocidade do vento, assim como a pressão do vento envolve a diferença entre as temperaturas do ar e do mar, a rugosidade da superfície do mar e a velocidade de fricção. Neste método, todos estes factores são representados pelo factor de pressão do vento  $U_A$ , com as unidades expressas em m/s, estando o mesmo relacionado com a agitação marítima.

O factor de pressão do vento por seu turno depende de diversos parâmetros, respectivamente: a elevação do local de medição, a localização, a estabilidade, e a duração média do vento.

A expressão do factor da pressão do vento é dada pela expressão:

$$U_A = 0.71U_{10}^{1.23} \quad (\text{Equação 2.2})$$

Onde:

$U_{10}$  é a velocidade do vento medida à 10 m acima do nível médio das águas do mar, modificada pela posição, diferença de temperatura ar - mar, estabilidade e duração.

Os parágrafos seguintes descrevem a influência de cada um destes parâmetros no factor de pressão do vento.

#### a. Elevação

Por convenção, o factor de pressão do vento é medido numa elevação de 10 m em relação ao nível médio das águas do mar. Se a velocidade do vento não tiver sido medida numa elevação de 10 m, é preciso ajusta-la empregando a fórmula apresentada na equação 2.3, válida para altitudes inferiores à 20 m.

$$U_{10} = U_z \left( \frac{10}{z} \right)^{1/7}, \text{ para } z < 20\text{m} \quad (\text{Equação 2.3})$$

Onde:

$U_{10}$ - Velocidade do vento a 10 m de elevação;

$U_z$ - Velocidade do vento numa elevação z em m.

#### b. Localização

Por em muita das vezes não ser possível instalar instrumentos de medição da velocidade do vento no meio do mar, no ponto em que se pretende conhecer as

características da agitação marítima, a velocidade do vento é estimada a partir de barcos ou de pontos de medição localizados em terra firme. Para a velocidade estimada visualmente em barcos corrige-se utilizando a equação 2.4.

$$U = 2.16 \times U_s^{7/9} \quad (\text{Equação 2.4})$$

Onde:

$U_s$  - velocidade do vento medida no barco [m/s]

$U$  - Velocidade do vento corrigida [m/s]

Se a informação do vento no mar não se encontra disponível, porém, existe informação num ponto do continente próximo ao ponto de interesse, o gráfico representado na figura 2.3 pode ser usado para converter o vento terrestre em vento marítimo.

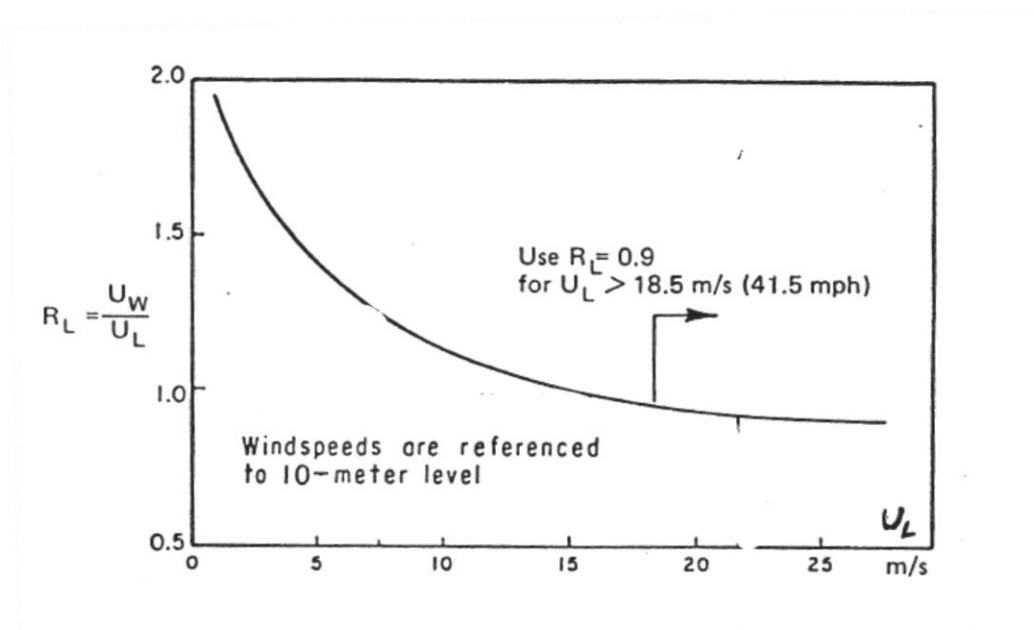


Figura 2.3: Razão entre velocidade do vento sobre o mar ( $U_w$ ) e velocidade do vento no continente ( $U_L$ ) (Fonte: Liu e Frigaard 2001).

### c. Correção da estabilidade

Se a diferença de temperaturas entre o ar e o mar ( $\Delta T = T_{ar} - T_{mar}$ ) é nula, então, não é necessária a correção. Porém, se essa diferença for positiva ou negativa é necessária a correção, que pode ser feita utilizando o gráfico representado na figura 2.4.

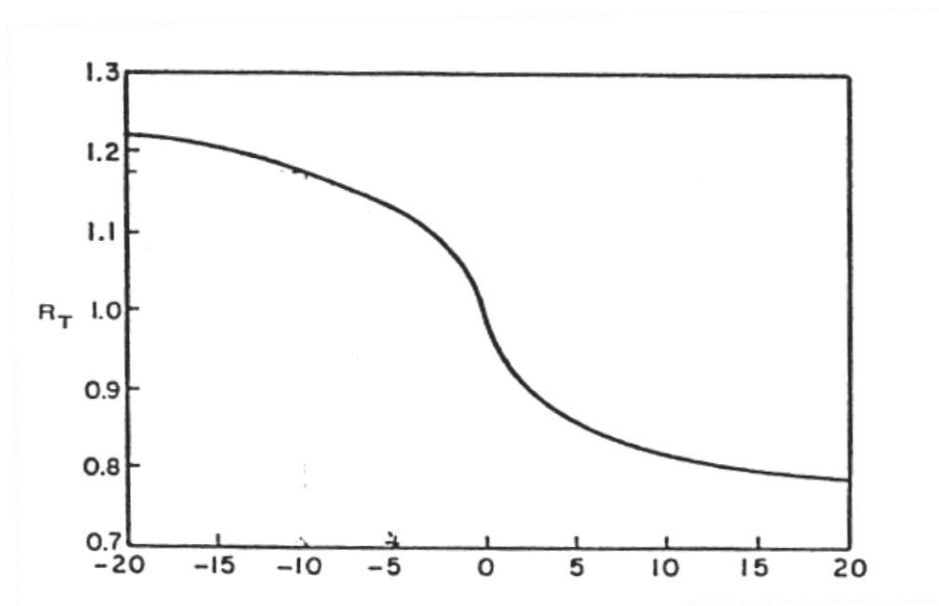


Figura 2.4: Factor  $R_T$  para diferenças de temperatura ar-mar (Fonte: Liu e Frigaard 2001).

Se não existir nenhuma informação sobre esta diferença, sugere-se a utilização dum factor de correcção  $R_T=1.1$ .

d. Duração média da velocidade do vento

A velocidade do vento é frequentemente observada e registada como a máxima velocidade média de curta duração. Esta velocidade registada deve ser convertida para uma velocidade do vento média em uma duração adequada. Para esta conversão usam-se as relações:

$$\frac{U_t}{U_{t=3600s}} = 1.277 + 0.296 \tanh\left(0.9 \log_{10}\left(\frac{45}{t}\right)\right), 1s < t < 3600s \quad (\text{Equação 2.5})$$

$$\frac{U_t}{U_{t=3600s}} = 1.5344 - 0.15 \log_{10}(t), 3600s < t < 36000s \quad (\text{Equação 2.6})$$

Onde:

$U_{t=3600s}$ - Velocidade média do vento.

### 2.1.2.3. Duração do vento e profundidade da água

A altura e o período de uma onda são funções da pressão do vento, do *fetch*, da duração do vento e da profundidade em que a onda se encontra. Assim, procede-se a caracterização da agitação em função da profundidade  $h$ , e da duração do vento  $t$ .

Para a caracterização da agitação em função da duração do vento, duas situações distintas podem ser identificadas, nomeadamente: *fetch* limitado e duração limitada. Quando o factor profundidade é tomado em consideração três situações possíveis podem ser observadas: águas profundas, águas intermédias e águas pouco profundas.

a. Fetch Limitado

Corresponde a situação em que o vento incide de forma constante durante um intervalo de tempo largo o suficiente para que a altura de onda no limite do *fetch* alcance o equilíbrio. O cálculo das características da agitação ao largo para a situação de *fetch* limitado irá diferir conforme se trate de águas profundas ou águas intermédias ou pouco profundas.

- Águas profundas

Corresponde a situação em que a duração do vento é maior que a mínima necessária,  $t_{min}$ , em segundos, para o alcance do equilíbrio da onda e é dada pela expressão:

$$\frac{gt_{min}}{U_A} = 68.8 \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{2/3} \quad (\text{Equação 2.7})$$

Nestas condições a altura de onda  $H_{m0}$  em metros e o período de pico  $T_p$  em segundos são dados pelas expressões:

$$\begin{cases} \frac{gH_{m0}}{U_A^2} = 0.0016 \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/2} \\ \frac{gT_p}{U_A^2} = 0.2857 \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/3} \end{cases} \quad (\text{Equação 2.8})$$

A equação 2.8 mostra que um *fetch* largo dá maior altura de onda e maior período de pico, porém, existe um limite, o denominado *fully arisen sea*. Esta condição é referente a situação em que as ondas já alcançaram um estado de equilíbrio e a energia do vento é equilibrada com a energia dissipada. Ocorre quando:

$$\frac{gF}{U_A^2} \geq 23123 \quad (\text{Equação 2.9})$$

Assim a equação 2.8 é válida até a situação  $\frac{gF}{U_A^2} = 23123$ , de modo que quando se verifica que  $\frac{gF}{U_A^2} \geq 23123$ , a altura de onda e o período de pico expressam-se pelas seguintes relações:

$$\begin{cases} H_{s,o} = 0.0016(23123)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{U_A^2}{g}\right) \rightarrow H_{s,o} = 0.243 \left(\frac{U_A^2}{g}\right) \\ T_p = 0.2857(23123)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{U_A}{g}\right) \rightarrow T_p = 8.134 \left(\frac{U_A}{g}\right) \end{cases} \quad (\text{Equação 2.10})$$

- Águas intermédias e pouco profundas

A partir de uma determinada profundidade, as características da agitação passam a sofrer a influência do fundo marinho. Nisto, parte da energia dissipa por fricção e por percolação, de modo que a altura de onda e o período de pico são menores que na situação de águas profundas. O SPM (1984) sugere a seguinte fórmula:

$$\begin{cases} \frac{gH_{m0}}{U_A^2} = 0.283 \tanh\left(0.53 \left(\frac{gh}{U_A^2}\right)^{3/4}\right) \tanh\left[\frac{0.00565 \left(\frac{gF}{U_A^2}\right)^{1/2}}{\tanh\left(0.53 \left(\frac{gh}{U_A^2}\right)^{3/4}\right)}\right] \\ \frac{gT_p}{U_A} = 7.53 \tanh\left(0.833 \left(\frac{gh}{U_A^2}\right)^{3/8}\right) \tanh\left[\frac{0.0379 \left(\frac{gF}{U_A^2}\right)^{1/3}}{\tanh\left(0.833 \left(\frac{gh}{U_A^2}\right)^{3/8}\right)}\right] \\ \frac{gt_{min}}{U_A} = 537 \left(\frac{gT_p}{U_A}\right)^{7/3} \end{cases} \quad (\text{Equação 2.11})$$

O SPM considera a equação acima de provisória, pois a sua modificação esta em curso para torna-la válida para águas profundas (geral).

b. Duração Limitada

Representa a situação em que a duração do vento é menor que a mínima necessária, porém, não existe uma fórmula específica. De modo que o SPM recomenda o uso da fórmula para o *fetch* limitado, porém, seguindo o procedimento:

- Verifique se  $t < t_{min}$ ;
- Substitua  $t_{min}$  por  $t$  na equação 2.7 e calcule o *fetch* fictício;
- Calcule  $H_{m0}$  e  $T_p$  pela equação 2.8 onde  $F$  é o *fetch* fictício.

O fluxograma seguinte descreve o procedimento descrito.



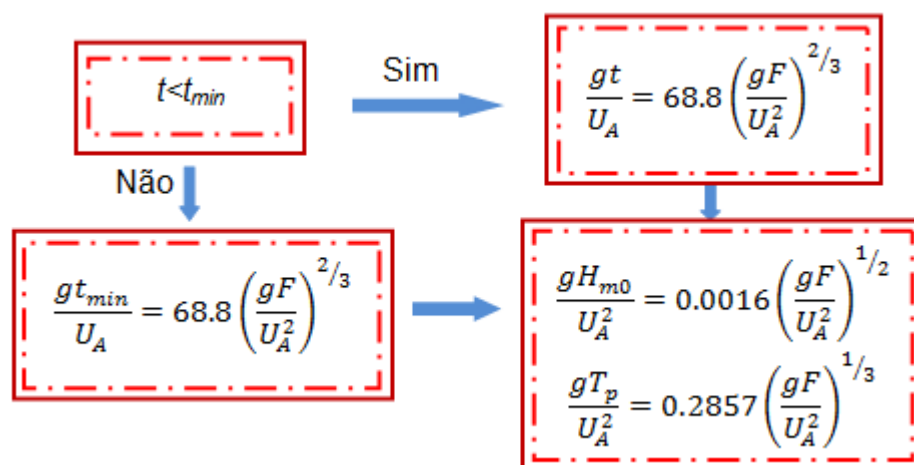


Figura 2.5: Fluxograma do procedimento no método do SPM para uma duração limitada.

## Propagação das ondas

Durante a sua propagação em direcção à costa, quando as ondas saem de águas profundas, onde a relação entre a profundidade ( $h$ ) e o comprimento de onda ( $L$ ) é aproximadamente  $h/L > 1/2$ , as ondas começam a ser afectadas pela batimetria do fundo. Nisto, elas experimentam processos que modificam suas características principais (altura, comprimento, velocidade e direcção) de tal forma que a caracterização das ondas ao largo, que se assume constante numa extensão muito grande, é diferente da caracterização na costa, que é própria de cada local.

Os principais processos físicos que ocorrem durante esta propagação das ondas, do largo para a costa são: empolamento, refacção, rebentação, difracção, reflexão e transmissão. Os primeiros 3 processos enumerados dependem de modo geral apenas da diminuição da profundidade, enquanto os outros, para além desta dependem também da existência de obstáculos físicos.

### 2.1.3. Empolamento

O empolamento é um fenómeno que se caracteriza pelo gradual aumento da altura de onda associado à diminuição do comprimento de onda durante a propagação da onda para água menos profundas.

Este fenómeno acontece porque quando a onda sente o fundo, a sua velocidade de propagação tende a reduzir. Contudo, o fluxo de energia entre duas cristas

consecutivas permanece constante, resultando assim num incremento da altura de onda.

Na figura 5 apresenta-se de forma esquemática as mudanças verificadas na altura da onda devido ao empolamento.

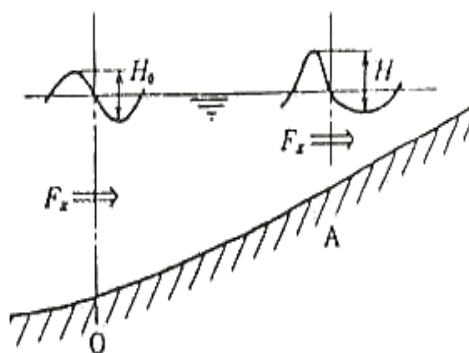


Figura 2.6: Representação esquemática do fenômeno de empolamento (Fonte: Marco 2005).

Para se quantificar este fenômeno, segundo a Teoria Linear de Ondas, para além do que já acima foi dito, assume-se que:

- A onda sofre somente alterações provocadas pela diminuição da profundidade;
- A onda incide perpendicularmente à costa;
- Não ocorre a rebentação da onda.

Devido ao incremento da altura de onda, acontece o aumento da energia, uma vez que é directamente proporcional a altura conforme mostra a equação 2.12.

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (\text{Equação 2.12})$$

Onde:

$E$  → Energia de propagação de onda [N/m];

$\rho$  → Massa volúmica da água, 1025 kg/m<sup>3</sup> para água salgada;

$g$  → Aceleração de gravidade (constante), 9.81 m/s<sup>2</sup>;

$H$  → Altura de onda [m].

Uma vez que o fluxo de energia não se altera,  $\Delta E c_g = 0$ , e sendo o fluxo de energia dado pela expressão apresentada na equação 2.13.

$$P = E c_g \quad (\text{Equação 2.13})$$

Onde  $c_g$  é a celeridade de grupo dada pela expressão:

$$c_g = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4\pi d/L}{\text{senh}(4\pi d/L)} \right] c \quad (\text{Equação 2.14})$$

E substituindo a equação 2.14 na equação 2.13 tem-se:

$$P = \frac{1}{8} \rho g H^2 \cdot \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4\pi h/L}{\text{senh}(4\pi h/L)} \right] c \quad (\text{Equação 2.15})$$

E igualando o fluxo de energia entre dois pontos, respectivamente:

$$E_1 \cdot c_{g1} = E_2 \cdot c_{g2} \quad (\text{Equação 2.16})$$

$$\frac{1}{8} \rho g H_1^2 \cdot c_{g1} = \frac{1}{8} \rho g H_2^2 \cdot c_{g2} \quad (\text{Equação 2.17})$$

Assim, a altura de onda modificada pelo fenómeno de empolamento é:

$$H_2 = H_1 \times \sqrt{\frac{c_{g1}}{c_{g2}}} \quad (\text{Equação 2.18})$$

Onde:

$P \rightarrow$  Fluxo de energia [N/s];

$c_g \rightarrow$  Velocidade de grupo [m/s];

$c \rightarrow$  Velocidade de fase [m/s];

$h \rightarrow$  Profundidade da água [m];

$L \rightarrow$  Comprimento de onda [m];

$\sqrt{\frac{c_{g1}}{c_{g2}}} = K_S \rightarrow$  Coeficiente de empolamento (*shoaling* em Inglês daí o índice s)

#### 2.1.4. Refracção

A refracção é a mudança de direcção da propagação da onda devido a sua incidência não perpendicular em relação às curvas de nível do fundo do mar (batimétricas). Por direcção de propagação da onda entende-se a direcção perpendicular à crista das ondas.

Quando a direcção de propagação das ondas forma um ângulo diferente de  $90^\circ$  com as batimétricas, surge um gradiente de velocidade que faz com que, as zonas que entram em contacto com o fundo mais cedo se desloquem mais devagar que as restantes. Assim, as ondas chegam praticamente todas ao mesmo tempo à linha da costa, e com as cristas paralela a esta. Na figura 2.6 pode-se ver como as ondas vão rodando durante a sua aproximação à linha de costa tendendo as cristas a ficar paralelas à linha de costa.

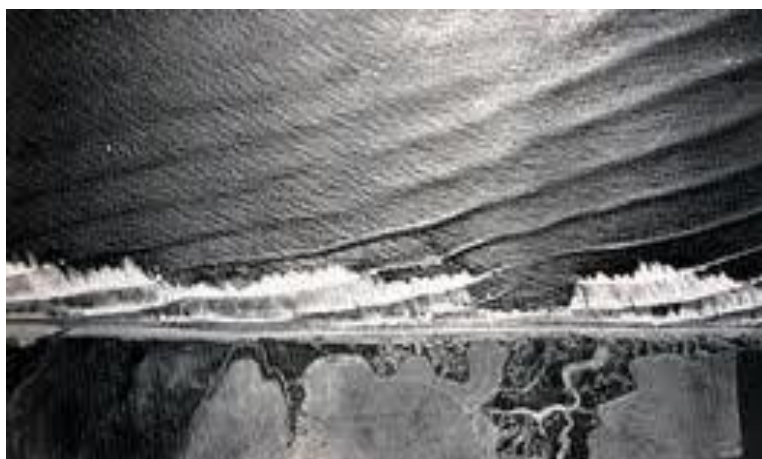


Figura 2.7: Fenómeno de Refracção (Fonte: ufjr 2012).

Para quantificá-la, pode-se também seguir a Teoria Linear, assumindo que:

- A onda sofre alterações somente pela diminuição da profundidade;
- O fluxo de energia constante e o período mantêm-se constantes;
- A onda incide perpendicularmente a costa;
- Não ocorre a rebentação da onda.

Assim, o fluxo de energia é:

$$P = E \cdot c_g \cdot b \quad (\text{Equação 2.19})$$

Uma vez que se assume que o fluxo de energia na propagação das ondas é constante:

$$E_1 \cdot c_{g1} \cdot b_1 = E_2 \cdot c_{g2} \cdot b_2 \quad (\text{Equação 2.20})$$

Substituindo a equação 2.12 na equação 2.20, tem-se:

$$\frac{1}{8} \rho g H_1^2 \cdot c_{g1} \cdot b_1 = \frac{1}{8} \rho g H_2^2 \cdot c_{g2} \cdot b_2 \quad (\text{Equação 2.21})$$

A nova altura da onda modificada pela refração e pelo empolamento é:

$$H_2 = H_1 \times \sqrt{\frac{c_{g1}}{c_{g2}}} \times \sqrt{\frac{b_1}{b_2}} \quad (\text{Equação 2.22})$$

Onde:

$b$  → Distância entre os raios. Ilustrada para uma melhor compreensão na figura 2.7.

$\sqrt{\frac{b_1}{b_2}} = K_R$  → Coeficiente de refração.

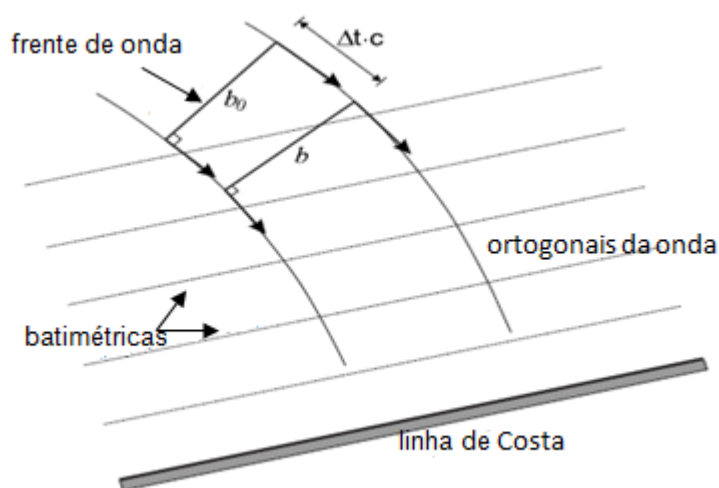


Figura 2.8: Parâmetros aplicados na Lei de Snell (Fonte: Andersen e Frigaard 2007).

Considerando que as batimétricas são rectilíneas e paralelas a linha da costa, pode-se aplicar a lei de Snell. A lei de Snell admite que há conservação da relação do ângulo entre a frente de onda e a linha de costa, e da velocidade ( $c/\text{sen}\alpha = \text{constante}$ ). Esta lei expressa-se conforme a equação 2.23.

$$\frac{\text{sen } \alpha_1}{\text{sen } \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (\text{Equação 2.23})$$

A lei de Snell também assume que há conservação da relação entre o ângulo da frente de onda em relação à costa e da distância entre os raios:

$$\frac{b_1}{\text{cos } \alpha_1} = \frac{b_2}{\text{cos } \alpha_2} \quad (\text{Equação 2.24})$$

Onde:

$\alpha \rightarrow$  Ângulo entre as cristas das ondas e as curvas de nível do fundo do mar [°].

$$K_R = \sqrt{\frac{b_1}{b_2}} = \sqrt{\frac{\cos\alpha_1}{\cos\alpha_2}}$$

### 2.1.5. Rebentação

Medições feitas durante tempestades mostraram que a altura de onda nunca supera aproximadamente 1/10 do seu comprimento, e em ensaios laboratoriais consegue-se somente um intervalo máximo de altura entre 1/10-1/8. Isto verifica-se pois acima desse valor a onda torna-se instável, rebenta e dissipa energia.

Este fenómeno acontece quando se verifica alguma das seguintes condições:

- A velocidade das partículas da crista é maior que a velocidade de fase;
- Quando a pressão a superfície livre pela equação de Bernoulli não corresponde a pressão atmosférica real;
- A aceleração das partículas da crista tende a separá-las da superfície de massa de água;
- A superfície torna-se vertical.

Estas condições por sua vez verificam-se quando há:

- Instabilidade da onda;
- Evolução da onda, ondas sem forma inicial, ou quando estão próximas de declividade limite, rompem para alcançar estabilidade;
- Perturbações: acção de vento, variação de profundidade, choque com obstáculos fixos ou móveis.

À medida que as ondas se aproximam da costa, o seu comprimento diminui e a sua altura aumenta. Aumenta também a declividade da onda. Portanto, a rebentação depende tanto da inclinação do perfil da praia (se for muito acentuada, a onda tende a reflectir-se completamente) como da profundidade relativa.

Dos vários critérios possíveis e existentes para determinar a profundidade de ocorrência de rebentação, destacam-se o critério de profundidade limite e o critério da declividade limite.

A equação 2.25 expressa uma expressão que pode ser aplicada para o cálculo da profundidade limite.

$$H_b \leq 0.78h_b \quad (\text{Equação 2.25})$$

A equação 2.26 apresenta o critério de Miche (1944), para a declividade limite.

$$\frac{H}{L} = 0.142 \tanh(kh) \quad (\text{Equação 2.26})$$

Existem outras expressões recomendáveis, que diferentes das anteriores têm em conta a inclinação do perfil da costa. Exemplo delas são as expressões de Ostendorf e Madsen (1979) apresentada na equação 2.27, e a de Goda (1975) apresentada na equação 2.28.

Ostendorf e Madsen (1979)

$$\begin{cases} \frac{H_b}{L_b} = 0.14 \tanh \left[ (0.8 + 5m) 2\pi \frac{h_b}{L_b} \right] & m < 0.1 \\ \frac{H_b}{L_b} = 0.14 \tanh \left( 1.3 \times 2\pi \frac{h_b}{L_b} \right) & m > 0.1 \end{cases} \quad (\text{Equação 2.27})$$

Goda (1975)

$$\frac{H_b}{L_0} = 0.17 \left[ 1 - e^{-1.5\pi \left( 1 + 15m^{4/3} \right) \frac{h_b}{L_0}} \right] \quad (\text{Equação 2.28})$$

Onde:

$m \rightarrow$  Declive da costa

O índice  $b$  indica que os valores da altura e da profundidade são para a linha de rebentação.

Uma vez que a rebentação não ocorre da mesma forma em todas as situações, dependendo da inclinação da praia e da declividade da onda distinguem-se três tipos relevantes de rebentação. São elas:

- Rebentação Progressiva (*Spilling*);
- Rebentação Mergulhante (*Plunging*);
- Rebentação Oscilante (*Surging*).

A quantificação do número de Iribaren ( $\xi$ ) permite classificar o tipo de rebentação em causa e traduz-se em:

$$\xi = \frac{\tan\beta}{\sqrt{\delta}} = \frac{m}{\sqrt{H_0/L_0}} \quad (\text{Equação 2.29})$$

Em que:

- $\xi < 0.5 \rightarrow$  Rebentação Progressiva (*Spilling*)
- $0.5 < \xi < 3.3 \rightarrow$  Rebentação Mergulhante (*Plunging*)
- $\xi > 3.3 \rightarrow$  Rebentação Oscilante (*Surging*)

a. Rebentação Progressiva (*Spilling*)

Associada a onda de grande declividade e a praias de inclinação suave, este tipo de rebentação também se associa a uma dissipação de energia numa região larga. Com o aumento da altura, a onda empola, mantendo o seu perfil simétrico até que sai uma pequena emulsão de ar da sua crista, representando a rebentação da onda (figura 2.9a).

b. Rebentação Mergulhante (*Plunging*)

Este tipo de rebentação é mais violenta, já que a dissipação de energia se dá numa região estreita. A frente de onda encurta, tornando-se cada vez mais inclinada, até que a dado momento se torna vertical e a parte superior da crista galga a parte inferior da onda caindo em mergulho (figura 2.9b).

c. Rebentação Oscilante (*Surging*)

Características de praias muito inclinadas e declividade de onda reduzida, induzindo a uma pequena dissipação de energia e a uma grande reflexão da onda.

Na figura 2.9 apresentam-se algumas fotos dos diferentes tipos de rebentação e na figura 2.10 apresenta-se de forma esquemática os diferentes tipos de rebentação.



a) Ondas com rebentação do tipo progressiva



b) Ondas com rebentação do tipo mergulhante



Figura 2.9: Fotos de alguns tipos de rebentação que ocorrem na natureza (Fonte: EurOtop Overtopping Manual 2007).

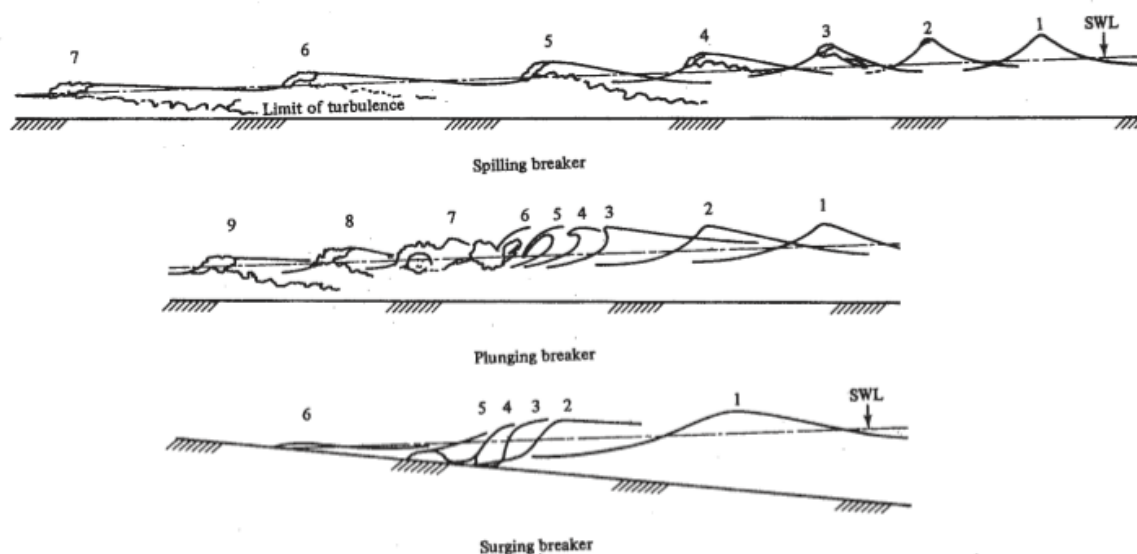


Figura 2.10: Esquema dos diferentes tipos de Rebentação (Fonte: Andersen e Frigaard 2007).

## 2.2. Marés

Entende-se por maré a oscilação periódica que provoca variação no nível das águas do mar. Existem dois tipos de marés: a maré astronómica e a maré meteorológica.

### 2.2.1. Maré Astronómica

Este fenómeno resulta da interacção gravitacional exercida pela lua e pelo sol sobre a superfície terrestre. A lua, apesar de ter uma massa muito menor à do sol (cerca de 27 milhões de vezes menor), exerce maior atracção as águas da superfície terrestre por se encontrar mais próxima desta. A maior variação de amplitude de maré está associada a combinação do movimento rotacional da terra e do movimento de translação da lua em volta da terra. Ao aumento do nível das águas do mar devido ao fenómeno de maré chama-se preia-mar. E ao fenómeno contrário dá-se o nome de baixa-mar.

No entanto, enquanto a lua exerce a sua atracção a superfície terrestre, verifica-se que no lado oposto (sem influência directa da lua) também se dá um aumento no nível das águas do mar. Isto acontece porque por inércia, a água tende a movimentar-se no sentido oposto. Quando a terra, a lua (nas fases nova e cheia) e o sol se encontram num alinhamento horizontal, verifica-se o fenómeno de maré viva, em que a variação do nível do mar é maior (maior e menor alturas de maré). Quando a lua esta nas fases crescente ou minguante, e se encontra desfasada 90° do alinhamento horizontal entre

a terra e o sol, verifica-se a então conhecida como maré morta (menor variação da amplitude de maré). Na figura 2.11 observa-se de forma esquemática os processos anteriormente explicados.



Figura 2.11: Esquema referente ao fenómeno de Maré (Fonte: astropt 2012).

De acordo com o período da oscilação identificam-se os seguintes tipos de marés:

- Maré do tipo diurna caracterizada pela ocorrência de uma preia-mar e uma baixa-mar num dia lunar;
- Maré do tipo semi-diurna constituída por duas preia-mares (sucedidas por 12 horas) e duas baixa-mares (sucedidas por 12 horas) num dia;
- Maré mista quando em locais típicos as marés do tipo semi-diurnas e as maré do tipo diurna são ambas factores importantes.

As marés em algumas baías têm um maior alcance comparativamente a maré verificada no oceano nas proximidades da baía. A água na baía tem um período de oscilação natural próximo ao período de maré astronómica, acumulando assim energia. Deste modo quando a onda de maré é reflectida no fundo da baía, gera uma onda que tem o mesmo comprimento e a mesma frequência que os da onda incidente. Quando a onda reflectida se move com a mesmas características que a onda incidente, gera-se uma onda estacionária e tem lugar a ressonância (Langa 2008).

As marés influenciam ainda na agitação marítima, pois geram correntes. A medida que se dá a elevação do nível das águas no mar, verifica-se também um movimento horizontal da água, a corrente de maré. Esta corrente tem grande importância em zonas estreitas como portos, estuários, baías pois pode atingir grandes velocidades,

afectando a vida animal e vegetal e induzindo a transporte de sedimentos. Quando a maré é alta, a corrente dirige-se rumo a costa e denomina-se corrente alta. Quando a maré baixa, o fluxo de corrente dirige-se ao mar e a esta chama-se corrente baixa.

### 2.2.2. Maré Meteorológica

O nível das águas do mar é também influenciado pela pressão atmosférica e pelo vento. Esta oscilação em função da variação de pressão e do vento é conhecida como maré meteorológica (*Storm surge*). As baixas pressões induzem o aumento do nível das águas do mar, enquanto as altas pressões conduzem a descida do nível das águas do mar.

A variação do nível de água provocada pelo vento é de grande importância no desenho de qualquer projecto marítimo. O aumento do nível da água resulta da tensão de corte do vento próximo à costa sobre a superfície da água. Esta subida no nível de água ocorre ao mesmo tempo que ocorrem as grandes ondas (ondas de largo período e altura) e é a causa da maior parte de desastres costeiros e inundações no mundo (Kamphuis 2000). Durante o temporal o nível de água na costa aumenta até um ponto em que a gravidade (a inclinação da superfície da água) neutraliza a tensão de cisalhamento do vento.

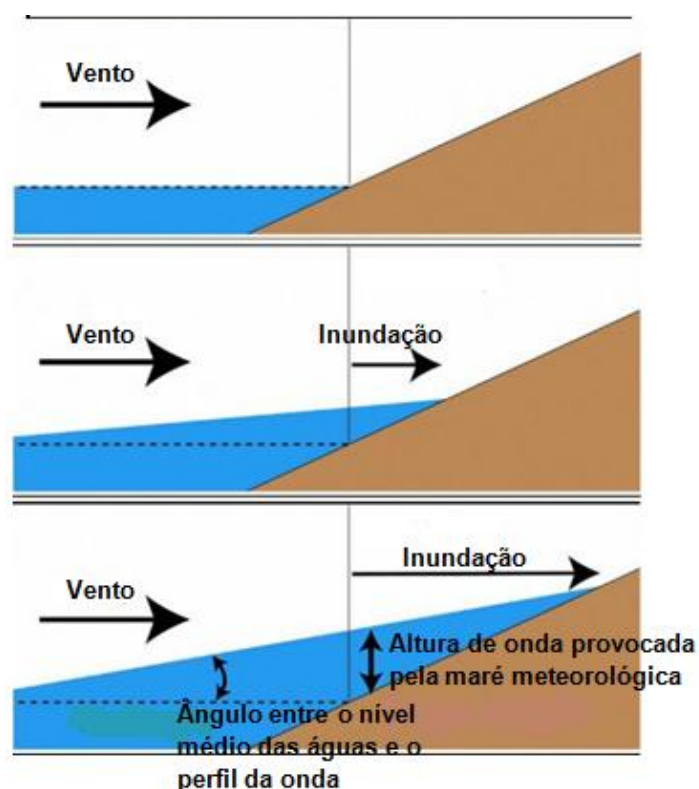


Figura 2.12: Maré Meteorológica (Fonte: OpenHazards 2012)

Um das formas de estimar a oscilação do nível do mar em função do vento expressa-se na equação 2.30. Contudo, a maré meteorológica é difícil de prever já que não representa uma oscilação periódica definida. Deste modo ela é geralmente estimada como sendo a diferença entre o nível do mar medido e a maré astronómica prevista.

$$\frac{dS}{dx} = \frac{\zeta(U\cos\phi)^2}{gD} \quad (\text{Equação 2.30})$$

Onde:

$S$  → Aumento do nível do mar por acção do vento [m]

$x$  → Distância sobre a qual o temporal é calculado [m]

$\zeta$  → Constante adimensional,  $3.2 \cdot 10^{-6}$

$U$  → Velocidade do vento [m/s]

$\phi$  → Ângulo entre a direcção do vento e o eixo  $x$  [°]

$D$  → Nova profundidade da água,  $D = (d + S)$  [m]

### 2.3. O Modelo SWAN

O SWAN é um modelo não linear espectral de terceira geração desenvolvido pela Delft *University of Technology* da Holanda (em constante desenvolvimento) que permite obter os parâmetros caracterizadores da agitação marítima em águas pouco profundas. Este modelo surge da necessidade de complementar modelos de águas profundas, já que ao simular a evolução da agitação marítima em águas de profundidade finita, tem em conta fenómenos físicos que não são considerados nos outros modelos. O modelo propaga, no domínio geográfico, o espectro direccionado e, conseqüentemente, calcula a evolução das ondas geradas pelo vento em zonas costeiras.

A formulação matemática do modelo envolve não só os fenómenos de geração, dissipação e interacção não linear entre quatro ondas característicos, por exemplo, do modelo WAM (Sampaio 2008), como também os processos existentes em águas pouco profundas, como a dissipação devido ao atrito do fundo, interacção não linear entre três ondas e rebentação induzida pela diminuição de profundidade.

Apresenta-se ainda vantajoso pois:

- É um modelo de domínio público (*freeware*) e em constante desenvolvimento;

- É possível 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;
- É um modelo versátil, já que pode ser aplicado a grandes zonas costeiras abertas ou confinadas e em ambos os casos a forçante do problema pode ser efectuada por ventos, ondas e/ou correntes;
- Tanto para uma zona costeira aberta, ou para uma confinada o modelo efectua a geração e propagação dessas ondas desde o largo até à zona costeira/portuária ou no interior do estuário.

A equação do balanço da energia espectral formulada em coordenadas Eulerianas é apresentada na expressão seguinte:

$$\frac{\partial E(f, \theta; x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x} E(f, \theta; x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y} E(f, \theta; x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta} E(f, \theta; x, y, t)}{\partial \theta} = \dots$$
$$\dots = S(f, \theta; x, y, t) \quad \text{(Equação 2.30)}$$

Esta equação inclui fenómenos como o empolamento, que está implícito na velocidade de grupo em função da profundidade, e a refacção, expressa pela taxa de velocidade de mudança de direcção  $c_{\theta,ref}$ . A difracção não é considerada e a variável  $c_{\theta}$  refere-se exclusivamente ao efeito de refacção.

### 2.3.1. Dados de entrada

Os principais dados de entrada para o programa SWAN são:

- a. Características da batimetria;
  - b. Domínio de trabalho e malha de cálculo;
  - c. Características do vento;
  - d. Condições de fronteira e condições iniciais;
  - e. Outros.
- 
- a. Batimetria

A batimetria da zona em estudo é um dado de entrada no SWAN imprescindível, pois este modelo tenta reproduzir a influência do fundo marinho na propagação da agitação marítima. Existem diferentes fontes de batimetria, exemplos destas são a GEBCO e a Etopo 2.

#### b. Domínio de trabalho e malhas de cálculo

No SWAN existem dois tipos de malhas de cálculo, a malha espectral e a malha espacial. A malha espectral é a malha de cálculo onde se define o intervalo de frequências do espectro que se quer estudar. Das malhas espaciais distinguem-se a malha computacional e a malha de *inputs*.

- A malha computacional é a malha onde se executam os cálculos;
- A malha de *inputs* é a malha onde se introduzem dados (batimetria, vento, correntes, etc).

As malhas espaciais podem ainda classificar-se segundo a sua forma geométrica em:

- A malha uniforme e rectangular que está incluída em um rectângulo onde a distância entre os pontos da malha nas direcções principais do rectângulo são constantes e de forma rectangular;
- A malha curvilínea que é incluída num trapézio, onde a distância entre os pontos da malha não se mantêm constante, mas o número de pontos nos lados opostos do trapézio são os mesmos e as células têm a forma trapezoidal.
- A malha desestruturada formada por pequenos triângulos de diferentes tamanhos.

Se a malha computacional é uniforme, as restantes também devem o ser (mesmo com dimensões diferentes), porém, tratando-se de uma malha curvilínea ou estacionária, as restantes malhas podem para além de serem do mesmo tipo, ser uniformes.

#### c. Vento

O modelo SWAN permite gerar ondas pela acção do vento e propaga-las. Para isso pode-se trabalhar com vento constante no espaço, ou com uma distribuição de ventos para o domínio de cálculo. Diferenciando-se caso estacionário, que não depende do tempo, do caso não estacionário, em que há variações no tempo.

#### d. Condições iniciais e de fronteira

Se não introduzimos condições iniciais o modelo SWAN calcula umas condições da superfície do mar em função do vento local a partir da curva de crescimento de Kahma e Calkoen (1992), válida para águas profundas, limitadas por valores de frequência de pico e altura de onda significantes de Pierson Moskowitz (1964). Este processo de cálculo procedido pelo SWAN na ausência de condições iniciais faz com que a simulação leve muito tempo a convergir.



Se não introduzimos condições de fronteira SWAN assume que na fronteira onde há água não entram ondas, mas podem sair as ondas geradas dentro do domínio. Isto gera um certo erro, de modo que estas fronteiras devem estar suficientemente afastadas da zona de estudo de maneira que isto não afecte aos resultados.

O espectro de frequência é função do vento, do *fetch* que o vento alcança e do período da onda. Quando o vento tem uma velocidade alta, o *fetch* é largo e os períodos das ondas são altos, verifica-se um estado de mar bem desenvolvido. No modelo SWAN pode-se trabalhar com diferentes tipos de espectros de frequência, como por exemplo JONSWAP, Pierson-Moskowitz e Gauss. O espectro de frequência JONSWAP é recomendado para estados de mar pouco desenvolvidos enquanto o espectro Pierson-Moskowitz é recomendado para estados de mar desenvolvidos (Holthuijsen 2007). O espectro JONSWAP é o espectro padrão do modelo SWAN.

e. Outros

Pode-se incluir outros ficheiros como por exemplo, correntes da zona.

### 2.3.2. Processos Físicos e Esquemas Numéricos

Os processos físicos incluídos no modelo SWAN são:

- Geração de agitação por vento;
- *Whitecapping*;
- Fricção com o fundo;
- Rotura por fundo;
- Dissipação devida à vegetação;
- Difracção;
- Transmissão detrás de um obstáculo;
- Interações não lineares ente ondas (quádruplas e triplas);
- *Set-up* induzido pela ondulação.

A difracção no modelo SWAN é muito aproximada pois é modelada num sentido muito restrito. Ela pode ser utilizada para obstáculos ocasionais como ilhas, baías, mares, mas não em portos ou em regiões próximas de paredes definidas por penhasco. E deve ser preferencialmente utilizada em áreas onde as variações na altura da onda são grandes para um intervalo de escala horizontal de comprimentos de onda pequenos.

Pode-se trabalhar com três modos diferentes, nomeadamente: modelo de 1ª geração, de 2ª geração ou 3ª geração. Segundo nossa escolha os anteriores processos físicos diferentes estarão ou não activados. De forma manual pode-se activar e desactivar também vários processos individualmente.



O modelo SWAN dispõe de três esquemas numéricos diferentes para resolver as equações de balanço de acção da ondulação.

- O BSBT que é um esquema de primeira ordem muito robusto, mas também muito difusivo para tempos de cálculo grandes, o que diminui a qualidade dos resultados.
- O SORDRUP que é um esquema de segunda ordem, utilizado em casos estacionários (definido por defeito).
- O S&L é um esquema de segunda ordem, utilizado em casos não estacionários (definido por defeito para casos não estacionários).

### 2.3.3. Dados de saída

SWAN pode gerar diferentes dados de saída. Gera resultados para uma malha, mas também pode gerar para um ponto, ou mesmo uma linha.

As malhas de *outputs* são malhas espaciais onde se obtém resultados (a altura significativa, os períodos de pico e médio, as direcções de pico e média, entre outros). Pode-se definir mais de uma malha de *output*.

## 2.4. Transporte longitudinal de sedimentos por acção das ondas

De modo geral, o transporte de sedimentos na costa, pode ser avaliado em função de uma variável representativa da onda em rebentação. Das várias formulações para o cálculo do transporte de sedimentos longitudinal destacam-se: A fórmula de CERC, A fórmula de Kamphuis e a fórmula de Van Rijn.

### 2.4.1. Fórmula de CERC (USACE, 1984)

Este método baseia-se na hipótese de que o transporte de sedimentos é directamente proporcional a componente paralela da costa do fluxo de energia na zona de rebentação.

O volume de sedimento transportado é estimado por meio da taxa de transporte potencial submerso. A equação 2.31 expressa a relação da taxa de transporte potencial (em N/s).

$$I_l = (\rho_s - \rho)g(1 - n)Q_l \quad (\text{Equação 2.31})$$

Onde:

$\rho_s \rightarrow$  Massa volúmica do sedimento

$n \rightarrow$  Porosidade do sedimento

$(1 - n)Q_l \rightarrow$  Volume sólido de transporte

Uma vez que a equação de CERC relaciona a taxa de transporte submergido com a componente longitudinal do fluxo de energia por unidade longitudinal de praia,  $P_l$ , temos:

$$P_l = (E \cdot c_g)_b \cdot \text{sen}\alpha_b \cdot \text{cos}\alpha_b \quad (\text{Equação 2.32})$$

Por se tratar de transporte de sedimentos dá-se em águas pouco profundas. A celeridade de onda é expressa pela equação seguinte:

$$c_g = \sqrt{\frac{gH_b}{\gamma}} \quad (\text{Equação 2.33})$$

Onde:

$\gamma \rightarrow$  Coeficiente de rebentação, adimensional.

A equação de CERC, em N/s é dada pela expressão:

$$I_l = K \cdot P_l \quad (\text{Equação 2.34})$$

Onde  $K$  é o coeficiente adimensional de proporcionalidade.

Substituindo a equação 2.32 na equação 2.34, temos:

$$I_l = K \cdot (E \cdot c_g)_b \cdot \text{sen}\alpha_b \cdot \text{cos}\alpha_b \quad (\text{Equação 2.35})$$

Sendo a energia de propagação:

$$E = \frac{\rho g H_b^2}{8} \quad (\text{Equação 2.36})$$

Substituindo ainda as equações 2.33 e 2.36 na equação 2.35, e considerando trigonometria obtemos:

$$I_l = K \cdot \left( \frac{\rho g H_b}{8} \cdot \sqrt{\frac{g H_b}{\gamma}} \right) \cdot \text{sen}(2\alpha_b) \quad (\text{Equação 2.37})$$

A partir da relação entre caudal e a taxa potencial de transporte de sedimento original, 2.31, obtemos em [m<sup>3</sup>/s] o caudal transportado:

$$Q_l = K \cdot H_b^{5/2} \cdot \text{sen}(2\alpha_b) \cdot \frac{\rho\sqrt{g}}{16\gamma^{1/2} \cdot (\rho_s - \rho)(1-n)} \quad (\text{Equação 2.38})$$

#### 2.4.2. Fórmula de Kamphuis (1991)

Segundo Kamphuis, uma vez que os detalhes dos processos físicos não são bem conhecidos, as relações de transporte de sedimento devem basear-se numa análise dimensional. Assim a taxa de transporte longitudinal de sedimento é expressa como função dos parâmetros seguintes:

$$Q_s = f(H, T, h, \mu, \rho, D, g, x, y, z, t, \rho_s, m) \quad (\text{Equação 2.39})$$

Onde:

$Q_s$  - Taxa de transporte de sedimento

$\mu$  - Viscosidade dinâmica da água

$D$  - Diâmetro do sedimento

$x, y, z$  - Direcções

$t$  - Tempo

Assim, a equação para a taxa de transporte longitudinal de sedimento expressa-se como:

$$\Pi_Q = \frac{Q_s}{\rho H^3/T} = \phi \left( \frac{gT^2}{H}, \alpha, \frac{h}{H}, \frac{\mu/\rho}{H^2/T}, \frac{x}{H}, \frac{y}{H}, \frac{z}{H}, \frac{t}{T}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{D}{H}, m \right) \quad (\text{Equação 2.40})$$

Pode-se simplificar ainda mais esta expressão assumindo as seguintes hipóteses:

- A relação  $h/H$  é definida pela rebentação da onda e é constante;
- Na zona de turbulência a viscosidade da água é irrelevante;
- Para a fórmula integrada as coordenadas espaciais não são importantes;
- A relação  $t/T$  não é importante;
- Uma vez que de modo geral se vai aplicar á fórmula em condições que se trata de água/areia, a relação  $\rho_s / \rho$  é constante.

$$\Pi_Q = \frac{Q_s}{\rho H^3/T} = \phi\left(\frac{gT^2}{H}, \alpha, \frac{D}{H}, m\right) \quad (\text{Equação 2.41})$$

Adicionalmente assume-se que:

- O transporte longitudinal segue uma relação tipo CERC e a dependência do ângulo é função de  $\sin 2\alpha$ ;
- A pente da praia,  $m$ , se define como  $h_b/X_b$ ;
- A relação  $gT^2/H$  é proporcional a curvatura das ondas  $L/H$ ;
- A altura de onda a usar é  $H_s$  e o período é  $T_p$ ;

$$\Pi_Q = \frac{Q_s}{\rho H^3/T} = K \left(\frac{H_{s,b}}{L_{0,p}}\right)^p m_b^q \left(\frac{H_{s,b}}{d_{50}}\right)^r \sin^s(2\alpha_b) \quad (\text{Equação 2.42})$$

Onde:

Os expoentes  $p$ ,  $q$ ,  $r$  e  $s$  são valores ajustados frente a dados de transporte respectivamente -1.25, 0.75, 0.25 e 0.6.

$L_{0,p}$  - Comprimento da onda em águas profundas dado pela expressão:

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (\text{Equação 2.43})$$

A fórmula de Kamphuis expressa em  $m^3/h$  é:

$$Q_s = 7.3 H_{s,b}^2 T_p^{1.5} m_b^{0.75} d_{50}^{-0.25} \sin^{0.6}(2\alpha_b) \quad (\text{Equação 2.44})$$

O índice  $b$  representa a linha de rebentação da onda (*breaking* em Inglês, daí o índice  $b$ ).

### 2.4.3. Fórmula de Van Rijn (2001)

A fórmula de Van Rijn baseia-se nas equações anteriores, porém utiliza também um modelo probabilístico centrado na zona de rebentação para calcular a distribuição do transporte de sedimento ao largo do perfil transversal da praia. Esta fórmula difere-se das outras por incluir na sua expressão os efeitos provocados pela maré.

$$Q_{t,mass} = 40 (H_{s,b})^3 \sin(2\theta_b) \quad (\text{Equação 2.45})$$

Onde:

$Q_{t,mass}$  → Transporte longitudinal de sedimento [kg/s]

$\theta_b \rightarrow$  Ângulo de rebentação da onda [°]

Esta equação pode também ser representada como:

$$Q_{t, mass} = K_1 (H_{s,b})^{2.5} V_{wave,L} \quad (\text{Equação 2.46})$$

Em que:

$$V_{wave,L} = K_2 (gH_{s,b})^{0.5} \text{sen}(2\theta_b) \quad (\text{Equação 2.47})$$

Sendo:

$V_{wave,L} \rightarrow$  Velocidade da corrente longitudinal na zona de rebentação

$K_1 \rightarrow$  Coeficiente de agitação

$K_2 \rightarrow$  Coeficiente de velocidade = 0.3

A fórmula simplificada de Van Rijn é:

$$Q_{t, mass} = K_0 K_{swell} K_{grain} K_{slope} (H_{s,b})^{2.5} V_{eff,L} \quad (\text{Equação 2.48})$$

Onde:

O  $K_0$  é uma constante adimensional igual à 42.

O  $K_{swell}$  é um factor de correcção para o mar de fundo (*swell*). Para o mar de vento (*sea*)  $K_{swell}$  é igual a unidade. O valor deste factor é dado na equação 2.49.

$K_{grain}$  é o factor de correcção para o tamanho da partícula expresso na equação 2.50 cujo valor mínimo é 1.

$K_{slope}$  é o factor de correção da inclinação do perfil da costa e toma valores máximo e mínimo de 1.25 e 0.75, respectivamente. A sua expressão é dada pela equação 2.51.

$V_{eff,L}$  é a velocidade longitudinal efectiva na zona de rebentação em m/s expressada na equação 2.52.

$$K_{swell} = T_{swell} / T_{ref} \quad (\text{Equação 2.49})$$

Onde:

$T_{ref}$  é o período de referência da onda equivalente à 6s.

$T_{swell}$  é o período da onda em segundos.

$$K_{grain} = d_{50,ref} / d_{50} \quad (\text{Equação 2.50})$$

Em que:

O  $d_{50,ref}$  é o diâmetro de referência que toma o valor de 0.2mm, para  $d_{50} > 2\text{mm}$ .

$$K_{slope} = (\tan\beta / \tan\beta_{ref})^{0.5} \quad (\text{Equação 2.51})$$

Onde:

$\tan\beta_{ref}$  é a inclinação de perfil de referência igual à 0.01.

$\tan\beta$  é a inclinação do perfil da costa.

$$V_{eff,L} = \left[ (V_{wave,L})^2 + (V_{tide,L})^2 \right]^{0.5} \quad (\text{Equação 2.52})$$

Onde:

$V_{wave,L}$  é a mesma referenciada na equação 2.47.

$V_{wave,L}$  é a velocidade longitudinal induzida pela maré na zona de rebentação que toma os seguintes valores: 0 m/s, na ausência de maré, 0.1 m/s para micro maré, 0.3 m/s para meso maré e 0.5 m/s para macro maré.

### 3. DESCRIÇÃO FÍSICA DA ÁREA EM ESTUDO

#### 3.1. Localização

Outrora conhecida como Baía de Delagoa, a Baía de Maputo é uma entrada do Oceano Índico localizada em Moçambique no sudeste do continente africano. Encontra-se no sul do País e esta geograficamente situada entre 25°40' S e 26°20' S de latitude e 32°30' E e 33°00' E de longitude.

Na região da Baía de Maputo existe uma grande diversidade natural caracterizada pela ocorrência de mangais, bancos de corais submarinos, pequenas ilhas e arquipélagos, entre outros. A norte é limitada pela foz do rio Incomati e pela península de Macaneta, a este pela península de Machangulo e pelas ilhas de Inhaca e dos Elefantes, a sul pelo rio Maputo e finalmente a oeste pelo estuário do Espírito Santo, formado pelos rios Matola, Umbeluzi, Tembe e Infulene, e ainda pela Cidade de Maputo. A figura 3.1 ilustra os limites atrás descritos.

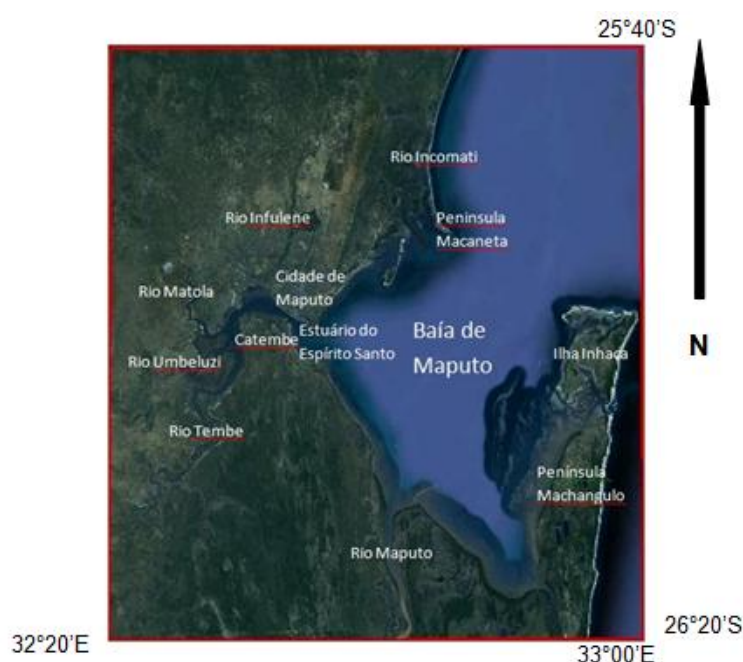


Figura 3.1: Limites e principais acidentes na Baía de Maputo (Fonte: Google earth).

#### Clima

O clima desta região é do tipo subtropical húmido (característico da zona litoral de Moçambique). Com duas estações predominantes: O Inverno frio e seco, que se estende desde Abril até Outubro, e o Verão quente e chuvoso entre Outubro e Março. A temperatura média anual é de cerca de 25°C e a precipitação média anual de

1200mm, ocorrendo entre os meses de Novembro e Abril (Hoguane 2007). Este clima é ainda influenciado pelo centro de altas pressões característicos do Oceano Índico e pela convergência intertropical na zona do Transval que conduz ao prolongamento do período chuvoso nesta região (tripod 2012).

### 3.2. Geomorfologia

Moçambique apresenta grande diversidade em termos de grupos morfoestruturais. A região Sul, onde se encontra a Baía de Maputo é marcada pela ocorrência de diferentes formações, tais como planícies de distintas constituições, vales submarinos e falhas. A Figura 3.2 ilustra as principais ocorrências geomorfológicas para a Baía de Maputo.

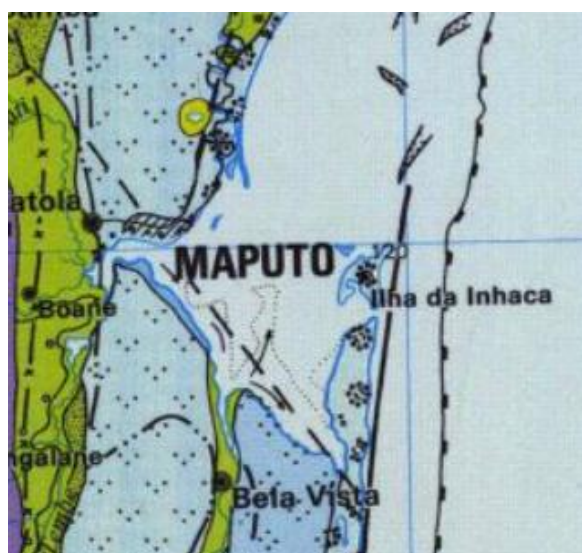














Figura 3.2: Mapa ilustrativo da geomorfologia da Baía de Maputo (Fonte: ISRIC 2012).

#### Legenda:

 - Planícies constituídas por depósitos de cor vermelha de grão grosseiro.	 - Vales submarinos.
 - Planícies e depressões constituídas por areias brancas de grão fino e restos de formações dunares antigas parcialmente pantanosas.	 - Limite da plataforma continental.
 - Formações dunares.	 - Falhas interpretadas.
	 - Alinhamentos de falhas abissais responsáveis pelas principais estruturas megamorfológicas regionais.



Continuação da legenda

 - Fundos e vertentes dos vales com terraços rochosos e outros com aluviões pouco espesso.	 - Oligocénico.
 - Planície baixa de origem sedimentar fluvial marinha.	 - Cretácico.
	 - Limite da zona de acumulação de materiais transportados pelos rios e sua direcção.

### 3.3. Demografia e Actividades Sócio Económicas

A zona costeira de Maputo abrange toda a província de Cidade de Maputo com cerca de 1 178 116 habitantes. Ocupa também uma grande área da província de Maputo em que abrange os distritos da Matola com cerca de 671 556 de habitantes, Boane com cerca de 102 555 habitantes, Marracuene com cerca de 84 975 habitantes, Manhica com cerca de 157 642 habitantes e Matutuine com cerca de 37 239 habitantes (INE, 2011).

Como principais actividades económicas para a região costeira de Maputo destacam-se: o comércio, transportes e comunicações. Estas actividades são sustentadas pela actividade portuária (pelo Porto de Maputo), pelo turismo, pelo comércio artesanal e pela pesca. A Figura 3.3 ilustra algumas destas actividades.

a) Actividade Pesqueira  
(Fonte: substratoweblog)



b) Actividade Portuária  
(Fonte: portosdeportugal)



c) Turismo (Fonte: macua)



Figura 3.3: Exemplos de actividades económicas na região costeira de Maputo.

### **Caracterização da agitação marítima na Baía de Maputo**

Estudos que caracterizam a agitação marítima na Baía de Maputo são exíguos. Alia-se este facto a inexistência de bóias ondógrafos para a medição de alturas, períodos e direcções de ondas. Perante este cenário de ausência de dados instrumentais, as caracterizações existentes baseia-me em dados obtidos de modelos numéricos.

#### **3.3.1. Caracterização da agitação marítima ao largo da Baía de Maputo**

O estudo Caracterização da agitação marítima ao largo da Baía de Maputo (Guiloviça 2011) descreve a agitação marítima ao largo da baía em estudo, baseando-se em dados obtidos pelo modelo *NOAA Wave Watch III (NWW3)* para o período 1998 - 2010, com uma resolução temporal de 3 horas. Os dados de ondulação foram extraídos para o ponto mais próximo da Baía de Maputo com coordenadas 38.75°E longitude e 26°S de latitude.

Este estudo identificou ainda a existência de duas estações para o clima de agitação da região, o verão e o inverno marítimo.

O verão marítimo esta compreendido entre os meses de Outubro e Março e representa a estação menos energética, caracterizando-se pela ocorrência de períodos de pico e alturas significativas menores.

O inverno marítimo, entre os meses de Abril e Setembro, que corresponde ao período mais energético. Durante o qual a frequência de ocorrência de temporais é mais alta comparativamente ao verão.

##### **a. Clima médio**

Para o clima médio este estudo verificou uma ocorrência de cerca de 30% de ondas com alturas entre 2.0 – 2.5 m e períodos entre 8 – 10 s para uma frequência de cerca

de 26%. As direcções das ondas predominam em cerca de 30% para 200°N e 22% para 110°N.

As características principais verificadas no verão e no inverno marítimo são apresentadas nos parágrafos seguintes.

- Verão marítimo

O verão é ainda caracterizado por uma maior incidência de ondas com alturas entre 2.0 – 2.5 m. As ondas provêm na sua maioria das direcções 200°N (28%) e 110°N (7%) e os períodos mais frequentes encontram-se entre 8 – 10 s, para uma ocorrência de cerca de 30%.

- Inverno marítimo

No inverno verifica-se predominantemente ondas provindas das direcções cerca de 200°N (cerca de 35%) e 225°N (cerca de 25%) e as alturas de onda mais frequentes encontram-se entre 2.0 – 2.5 m. Verifica-se ainda nesta estação maior ocorrência de períodos entre 12 – 14 s com uma frequência de cerca de 30%.

As tabelas 3.1 e 3.2 mostram de forma resumida as principais características do verão e do inverno marítimo anteriormente descritas e na figura 3.4 apresenta-se a rosa de ondulação para o período de 1998 – 2010, resultado do estudo Guiloviça (2011).

Tabela 3.1: Frequências de  $H_s$  e  $T_p$  do verão e inverno marítimo.

	Verão marítimo		Inverno marítimo	
	Valores	Frequência (%)	Valores	Frequência (%)
$H_s$ (m)	2.0 – 2.5	30	2.0 – 2.5	30
$T_p$ (s)	8 – 10	30	12 - 14	30

Tabela 3.2: Frequências para as principais direcções das ondas para o verão e inverno marítimos.

Direcções (°N)	Verão marítimo		Inverno marítimo	
	200	110	200	225
Frequências (%)	28	27	35	25

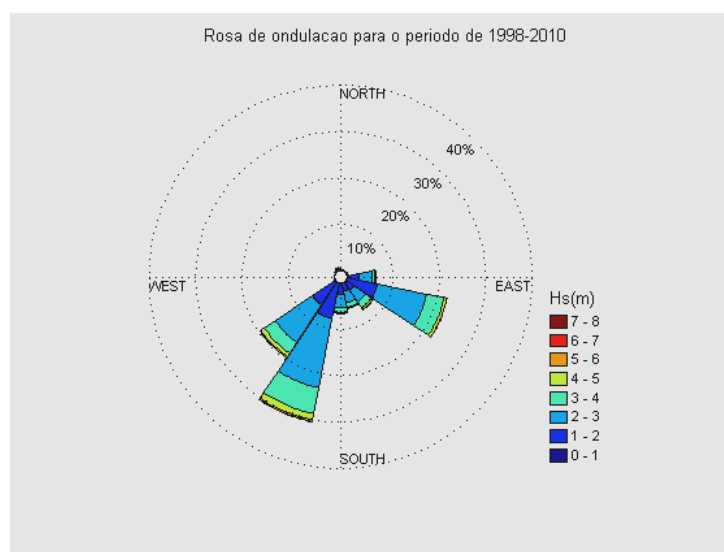


Figura 3.4: Rosas de Ondulação para o largo da Baía de Maputo (Fonte: Guiloviça 2011).

#### b. Clima Extremo

Ainda em Guiloviça (2011) foram obtidos resultados referentes ao clima extremo, considerando que o temporal começa quando a altura da onda é superior a quatro metros (4m).

Tabela 3.3: Principais características dos temporais de 1998-2010, para  $H_{s,limite}=4m$  (Guiloviça 2011).

Direcção	$H_{s,med}(m)$	$H_{s,máx}(m)$	$T_{p,med}(s)$	$T_{p,máx}(s)$
És-sudeste	4.33	5.22	9.08	10.90
Su-sudoeste	4.56	7.07	12.51	17.30
Sudoeste	4.48	6.55	12.67	18.00
Todas	4.48	7.07	14.55	18.00

#### 3.3.2. Caracterização da agitação marítima no interior da Baía de Maputo

O estudo “Problemas na zona costeira de Moçambique com ênfase para a costa de Maputo” efectuou a caracterização da agitação marítima no interior da Baía de Maputo tendo como base observações e medições de altura, períodos e direcções de ondas, levadas a cabo pelo UK Meteorological Office entre 1949 e 1997 (Langa 2007).

Verificou-se neste estudo que o regime de ventos é caracterizado pelas ocorrências de ventos com velocidades entre 3.5 - 5.5 m/s. A maior incidência destes ventos verifica-se para as direcções Nordeste, Este, Sul, Sudoeste e Noroeste.

Neste estudo verificou-se também a existência de dois tipos de ondas nesta região: as ondas geradas ao largo e as vagas, que são ondas geradas localmente (isto é, geradas no interior da Baía de Maputo).

a. Ondas geradas no interior da Baía

As vagas têm origem entre as direcções Este e Sul e as suas características são função dos ventos gerados no interior da Baía de Maputo, do *fetch* e da batimetria desta região. Estas ondas são geradas pelas correntes eólicas do interior da Baía e propagam-se em toda a extensão da costa. Assim, a zona de estudo é atingida a Nordeste pelas vagas do Sul e a Sul, pelas vagas entre as direcções Sul e Este. Em todas as direcções de propagação das ondas referidas, verificou-se que a ondulação sofre influência de reflexão na incidência com a ilha de Xefina Grande, assim como da refacção.

- Direcção Sul: A sua propagação é feita predominantemente na direcção inicial;
- Direcção Sudeste: A sua propagação é inicialmente dispersa para nordeste e sudeste, orientando-se depois na direcção noroeste ate atingir a costa de Maputo.

b. Ondas geradas ao largo da Baía

As ondas geradas ao largo por acção de correntes eólicas viajam predominantemente nas direcções Este e Nordeste.

- Direcção Este: A sua propagação é inicialmente feita na direcção principal de geração. A ondulação é posteriormente afectada pela refacção tendendo a desviar-se para Sudoeste em direcção à desembocadura do rio Maputo, sendo que parte dela mentem a direcção inicial incidindo perpendicularmente a zona costeira da baía de Maputo;
- Direcção Nordeste: A sua propagação é predominantemente feita na direcção principal de geração. A ondulação é também afectada pela reflexão pela incidência com a ponta da Macaneta e com a ilha de Xefina de Meio, propagando parte da ondulação para o Sudoeste.

### 3.4. Marés

A agitação marítima na Baía de Maputo é também influenciada pelas marés, astronómica e meteorológica.

A maré do tipo semi-diurna é a mais frequente na Baía de Maputo, com uma frequência de 89.38% e uma amplitude de cerca de 1.97m (Langa 2008). Ocorrem assim num dia, duas preia-mares sucedidas num intervalo de cerca de 12 horas, e duas baixa-mares, sucedidas no mesmo intervalo. A máxima maré viva ocorre no período de passagem dos equinócios, em Março e Setembro com cerca de 3.8 m de amplitude. Nesta mesma época, a maré também ocorre com uma amplitude mais baixa, de cerca de 0.2 m. A máxima maré morta ocorre na passagem do solstício de inverno, no mês de Julho. O INAHINA, tem marégrafos instalados nos principais portos de Moçambique, dentre os quais o Porto de Maputo (MPDC). Esta instituição efectua as previsões de marés astronómicas para a Baía de Maputo sendo as marés meteorológicas estimadas pela diferença entre a maré verificada e a prevista.

## 4. PROPAGAÇÃO SEGUNDO A TEORIA LINEAR

A Teoria Linear de Propagação sustenta-se em formulações teóricas baseadas na Teoria Linear de Ondas. Nesta teoria associa-se fundamentalmente as alterações que a onda sofre na sua propagação a sua altura de onda, seu período de onda e sua direcção.

Dada a escassez de informação sobre a agitação marítima na região costeira de Maputo, este estudo foi feito com base nos dados obtidos pelo NWW3 (a mesma série de dados usada em Guiloviça 2011). O ponto de onde foram obtidos os dados desta série encontra-se distado da costa de Maputo em cerca de 600 km. A figura 4.1 ilustra o ponto P.

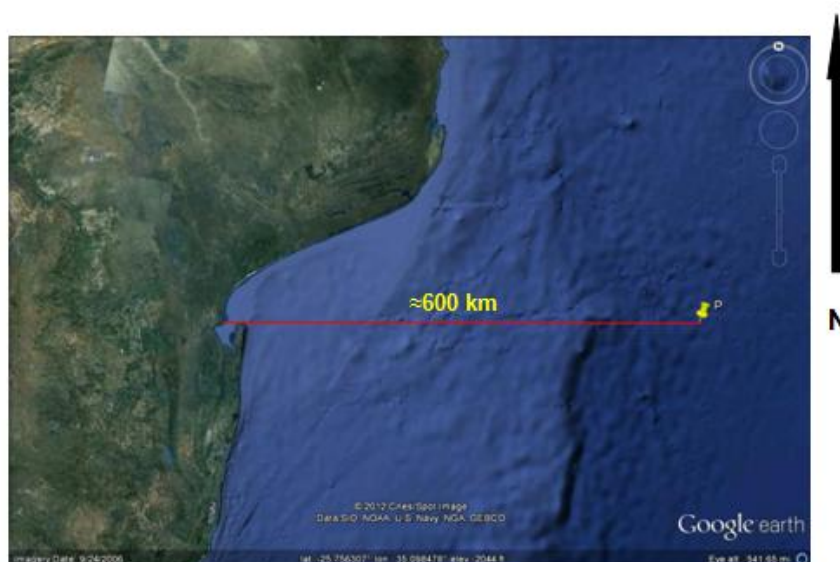


Figura 4.1: Ponto de onde se obtiveram os dados de agitação marítima provenientes do modelo NWW3 (Fonte: Google earth).

### - Clima médio

O principal objectivo desta análise é de reproduzir a agitação marítima nas suas condições mais frequentes. O seu resultado é fundamental para estudos da dinâmica litoral, exploração de portos e planificação de obras. O clima médio pode ser estudado por meio de distintas análises, umas delas é com recurso a tabelas de contingência.

As tabelas de contingência relacionam a ocorrência de uma altura e período de onda, a uma determinada direcção. Assim, dividiu-se a série de dados em intervalos de direcções de 22.5°. Desta divisão resultaram 16 tabelas de  $H_s$  (em intervalos de 0.5 m) e  $T_p$  (em intervalos de 2 s). A tabela 4.1 mostra as frequências (em percentagem) de cada período em função da direcção de propagação.



Tabela 4.1: Frequências dos períodos das ondas em função das direcções de propagação.

Tp (s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
2-4			0.003				0.003		0.003			0.003	0.003				0.013
4-6	0.190	0.047	0.003		0.050	0.219	0.234	0.305	0.192	0.074	0.024	0.005	0.005		0.071	0.332	1.751
6-8	0.166	0.129	0.147	0.197	3.162	9.583	2.390	1.372	0.795	0.621	0.050	0.026	0.011	0.016	0.124	0.355	19.144
8-10	0.003	0.008	0.024	0.132	2.891	11.054	3.449	2.590	2.519	2.509	0.424	0.003				0.008	25.613
10-12		0.024	0.005		0.124	1.169	1.048	1.224	2.646	12.007	4.818		0.003				23.067
12-14					0.013	0.034	0.095	0.105	0.334	12.252	10.886						23.720
14-16							0.003	0.008	0.092	2.764	3.070						5.937
16-18									0.005	0.345	0.371						0.721
18-20									0.003	0.008	0.024						0.034
<b>Total</b>	<b>0.358</b>	<b>0.208</b>	<b>0.182</b>	<b>0.329</b>	<b>6.239</b>	<b>22.059</b>	<b>7.221</b>	<b>5.605</b>	<b>6.589</b>	<b>30.580</b>	<b>19.666</b>	<b>0.037</b>	<b>0.021</b>	<b>0.016</b>	<b>0.195</b>	<b>0.695</b>	<b>100</b>

Com os resultados obtidos na análise do clima médio, calculou-se uma altura característica associada a um período e a uma direcção, a altura morfológica. Esta altura expressa-se em metros segundo a equação 4.1.

$$H_{mor} = \left( \frac{\sum H_i^p \cdot f}{\sum f} \right)^{\frac{1}{p}} \quad (\text{Equação 4.1})$$

Onde:

$H_i$  – Alturas distintas para um intervalo de períodos em cada direcção [m]

$f$  – Frequência da observação

A tabela 4.2 apresenta as alturas morfológicas resultantes desta análise.

Tabela 4.2: Alturas morfológicas calculadas para o clima médio.

Tp (s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2-4			1.50				1.50		1.00			1.50	2.00			
4-6	2.12	2.05	2.00		1.91	2.18	2.31	1.83	2.40	2.27	2.22	2.55	2.00		2.33	2.18
6-8	2.33	2.32	2.31	2.55	2.32	2.57	2.81	2.90	2.78	2.69	2.99	2.40	3.00	2.53	2.86	2.89
8-10	3.00	2.84	3.13	3.61	2.76	3.04	2.99	2.76	2.68	2.74	3.23	3.00				3.52
10-12		3.30	4.00		3.72	3.21	2.92	2.79	2.75	2.66	2.62		2.00			
12-14					4.00	3.13	3.58	3.07	3.10	3.01	2.74					
14-16							2.00	1.74	2.94	3.26	3.12					
16-18									2.76	3.42	3.03					
18-20									2.50	3.08	2.38					

Para proceder a propagação linear considerou-se:

- A escolha de uma zona para o estudo, que neste caso debruça-se sobre um trecho da península Machangulo, a norte da Ponta Mucombo, mostrada na figura 4.2;
- A propagação das  $H_{mor}$  desde o ponto P (Figura 4.1) para as direcções que provavelmente atingem a costa em estudo (resultados das tabelas de contingência), cujas características apresentam-se na tabela 4.3;
- O fenómeno de empolamento da onda (Equação 2.18);



- O fenómeno de refacção da onda (Equação 2.22);
- Um coeficiente de rebentação,  $\gamma = 0.78$  (Equação 2.25);
- Propagou-se até a profundidade em que  $|H_s - H_b| \leq 0.01$ ;
- Mediu-se o ângulo entre a costa e o Norte,  $\beta = 7.2^\circ$  (Figura 4.3), sendo o ângulo  $\alpha$  o formado entre a frente de onda e a normal à costa.



Figura 4.2: Zona de estudo da propagação Linear de ondas (Fonte: Google earth).

Tabela 4.3:  $H_s$  (m) para  $T_p$  e direcções ao largo consideradas na propagação Linear.

$T_p$ (s)	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
3	-----	1.50	-----	-----	-----	1.50	-----	1.00
5	2.05	2.00	-----	1.91	2.18	2.31	1.83	2.40
7	2.32	2.31	2.55	2.32	2.57	2.81	2.90	2.78
9	2.84	3.13	3.61	2.76	3.04	2.99	2.76	2.68
11	3.30	4.00	-----	3.72	3.21	2.92	2.79	2.75
13	-----	-----	-----	4.00	3.13	3.58	3.07	3.10
15	-----	-----	-----	-----	-----	2.00	1.74	2.94
17	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	2.76
19	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	2.50



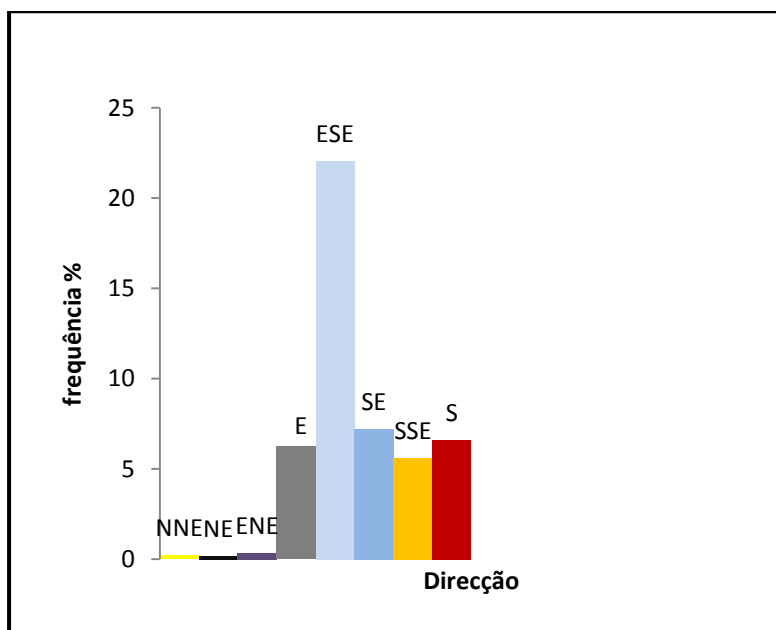
Figura 4.3: Ângulo  $\alpha$  medido na zona dos estudo (Fonte: Google earth).

Os resultados desta propagação são apresentados no Anexo 1 e de forma sintética na tabela 4.4 e na figura 4.4, apresentando as características principais das ondas em estudo.

Tabela 4.4:  $H_b$  (m) e  $T_p$  (s) para as direcções consideradas ao largo na propagação Linear.

$T_p$ (s)	$NNE_0$	$NE_0$	$ENE_0$	$E_0$	$ESE_0$	$SE_0$	$SSE_0$	$S_0$
3	-----	0.515	-----	-----	-----	0.605	-----	0.106
5	0.657	1.101	-----	1.356	1.589	1.556	0.857	0.477
7	0.607	1.054	1.500	1.428	1.602	1.606	1.250	0.464
9	0.668	1.330	2.015	1.524	1.708	1.477	0.978	0.371
11	0.709	1.618	-----	1.991	1.609	1.250	0.865	0.334
13	-----	-----	-----	1.966	1.398	1.472	0.880	0.350
15	-----	-----	-----	-----	-----	0.615	0.374	0.298
17	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.252
19	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.203

a) Direcções ao largo



b) Tendências das direcções no ponto de rebentação

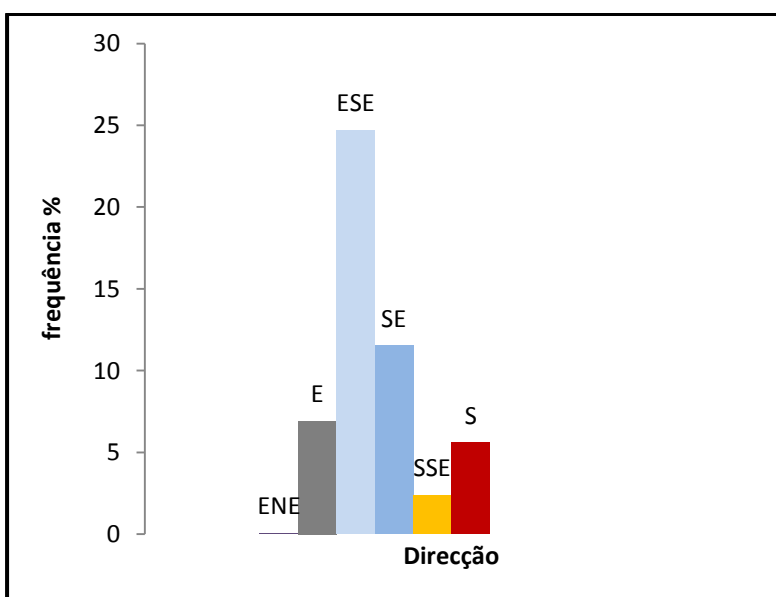


Figura 4.4: Frequência das direcções da propagação linear.

A teoria linear por ser simplificada ignora vários processos que influenciam na propagação das ondas. Enumerem-se seguidamente, as principais limitações da propagação linear neste estudo.

- A teoria linear despreza a influência de vários parâmetros como o vento, a difracção e a interacção com o fundo (batimetria) que é um factor muito importante na propagação e modificação das características das ondas;

- A teoria linear despreza também a modificação dos períodos das ondas que se mantêm constantes em toda propagação;
- Na propagação linear só se podem propagar ondas cuja direcção ao largo chegaria à costa, desta forma, neste estudo só se consideraram as ondas provenientes das direcções entre  $0^{\circ}\text{N}$  -  $180^{\circ}\text{N}$ , e uma propagação para o interior da Baía de Maputo limitar-se-ia as ondas provenientes das direcções entre  $0^{\circ}\text{N}$  -  $90^{\circ}\text{N}$ ;
- Não foi possível estudar o melhor critério de rebentação a usar, uma vez que não se conhecesse a inclinação do perfil da praia.

## 5. PROPAGAÇÃO COM O MODELO SWAN

Uma vez que o ponto de onde foi possível conhecer os dados de agitação marítima encontra-se longe da costa de Maputo decidiu-se estudar duas malhas de cálculo para diferentes resoluções com o intuito de avaliar a qualidade dos resultados obtidos na região de estudo.

Assim, temos uma malha maior (M1) que ocupa uma área de  $8^\circ \times 9^\circ$ , e uma menor (M2) com uma área de  $1.6^\circ \times 2.4^\circ$ . A figura 5.1 representa as malhas de cálculo consideradas no estudo.

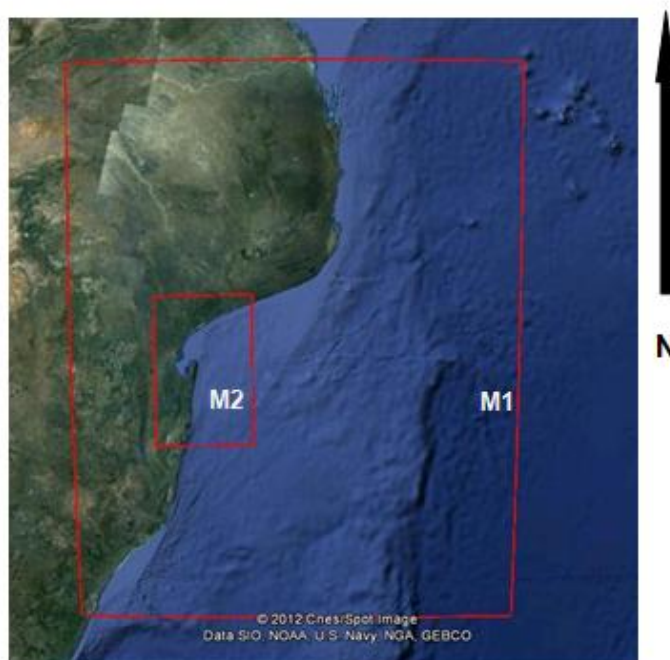


Figura 5.1: Malhas de cálculo para a propagação em SWAN (Fonte: Google earth).

Propagou-se para malha M1 uma onda aleatória desde o ponto P representativa e colheram-se em dois pontos, P1 ( $26^\circ\text{S}$  e  $34^\circ\text{E}$ ) e P2 ( $26^\circ\text{S}$  e  $32.7^\circ\text{E}$ ). Posteriormente, propagou-se desde a malha M2 considerando como dados de entrada os resultados no ponto P1. A figura 5.2 ilustra as malhas e os pontos.

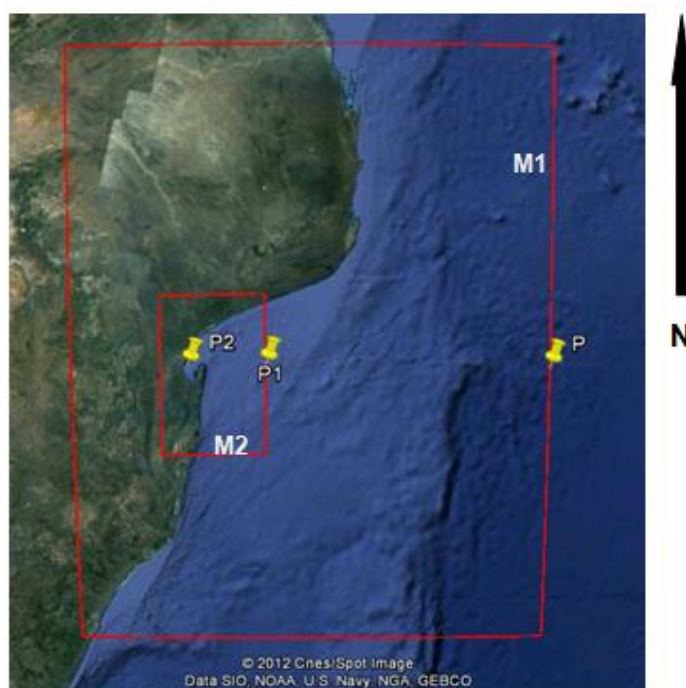


Figura 5.2: Malhas de cálculo e pontos considerados no estudo (Fonte: Google earth).

A tabela 5.1 mostra os resultados obtidos no ponto P2 em função das diferentes resoluções consideradas e do tempo necessário para a simulação.

Tabela 5.1: Resultados das características das ondas no ponto P2 em função da resolução das malhas.

Resolução (m)	1600			1000			950			890		
	M1	M2	ξ	M1	M2	ξ	M1	M2	ξ	M1	M2	ξ
T cálculo (min)	2	1		5	1		13	1		120	1	
Batimetria (m)	8.99	8.70	3	8.76	8.77	0.1	9.00	8.95	0.6	9.00	8.96	0.4
H <sub>s</sub> (m)	0.90	0.96	6	0.79	0.83	5	0.66	0.77	14	0.65	0.67	3
T <sub>p</sub> (s)	8.9	7.42	16	9.04	7.6	16	8.97	7.5	16	8.94	7.37	17
Direcção (°)	70.2	70.4	0.3	69.2	68.4	1	67.0	67.6	0.7	65.6	66.5	1

Onde:

ξ → Erro

Depois deste estudo prévio decidiu-se considerar a propagação a partir da malha M1 (malha de cálculo) para uma resolução de 950 m (os pontos da malha computacional estão distanciados 950 m entre si). Esta decisão teve em conta os resultados obtidos, principalmente na questão do tempo de cálculo, uma vez que este torna-se preponderante na realização de qualquer estudo.

Para proceder à propagação da agitação marítima com o modelo SWAN foram considerados os seguintes dados de entrada:

- Das distintas opções para obter a batimetria, optou-se a disponível pela GEBCO com uma resolução de 30 segundos, uma vez que é de acesso gratuito e cobre toda região mundial. A batimetria utilizada pode ser vista na figura 5.3;
- Dados de agitação resultantes da análise do clima médio e do clima extremo (altura de onda, período e direcção);
- A consideração do efeito da difracção das ondas (devido as ilhas de Inhaca e Xefina, e a península de Machangulo);
- Condições de fronteira ao longo malha de cálculo, para a(s) face(s) conveniente(s) tendo em conta a direcção da onda considerada.

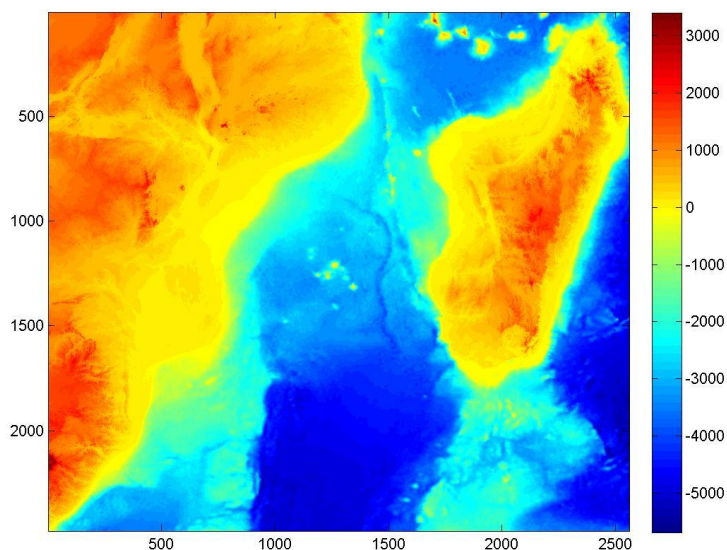


Figura 5.3: Batimetria obtida pela GEBCO utilizada na propagação com SWAN.

Uma vez que a resolução da batimetria obtida é muito baixa, optou-se por limitar a propagação à entrada da Baía de Maputo. Assim, escolheu-se um ponto para o estudo cujas coordenadas são 25°48'S de latitude e 33°04'E de longitude apresentado na figura 5.4. O ponto escolhido encontra-se a uma profundidade de 60 m (para se efectuar uma comparação de análises entre os resultados obtidos com a propagação linear e com a propagação numérica) tendo-se propagado a agitação marítima para o



caso mais frequente em cada uma das direcções, com excepção do SSW que por ser o caso mais frequente propagou-se para 4 períodos diferentes.



Figura 5.4: Localização do ponto de estudo (Fonte: Google earth).

A eleição deste ponto foi feita analisando prévia e cuidadosamente a batimetria com o auxílio do programa *Matlab*. A imagem utilizada para a análise da batimetria é apresentada na figura 5.5.

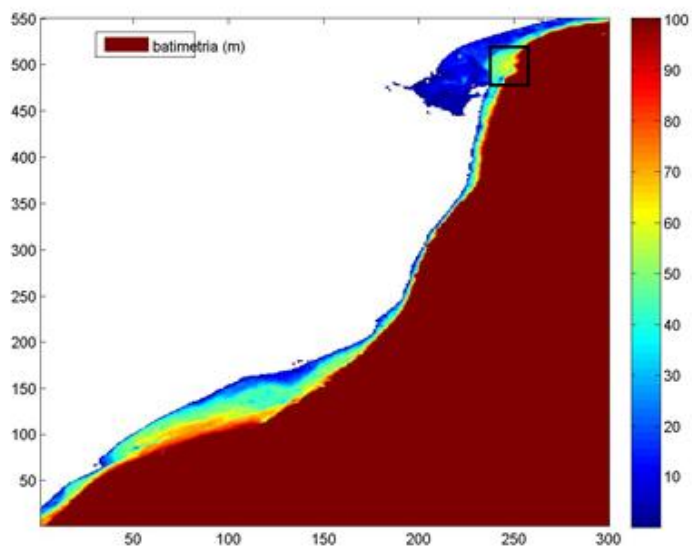


Figura 5.5: Imagem produzida para escolha do ponto em estudo.

Nos próximos pontos descrevem-se as diferentes simulações, de acordo com os distintos parâmetros considerados.



- a. Para as condições mais frequentes propagaram-se as alturas morfológicas obtidas na análise do clima médio. Os resultados desta propagação encontram-se no Anexo 2, apresentando-se na figura 5.6 um exemplo dos resultados do modelo SWAN com auxílio do programa Matlab. Na tabela 5.2 encontram-se as características ao largo das ondas propagadas para o ponto de estudo à 60 m de profundidade.

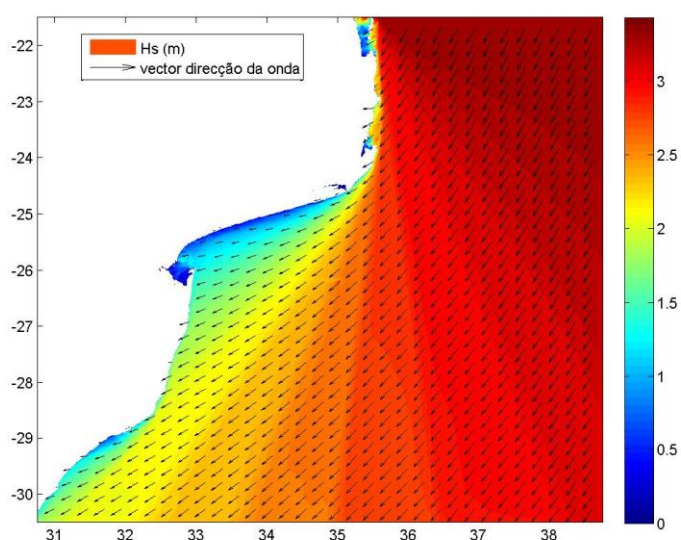


Figura 5.6: Exemplo dos resultados das simulações com o modelo SWAN.

Tabela 5.2: Características das ondas ao largo do clima médio propagadas com o modelo SWAN.

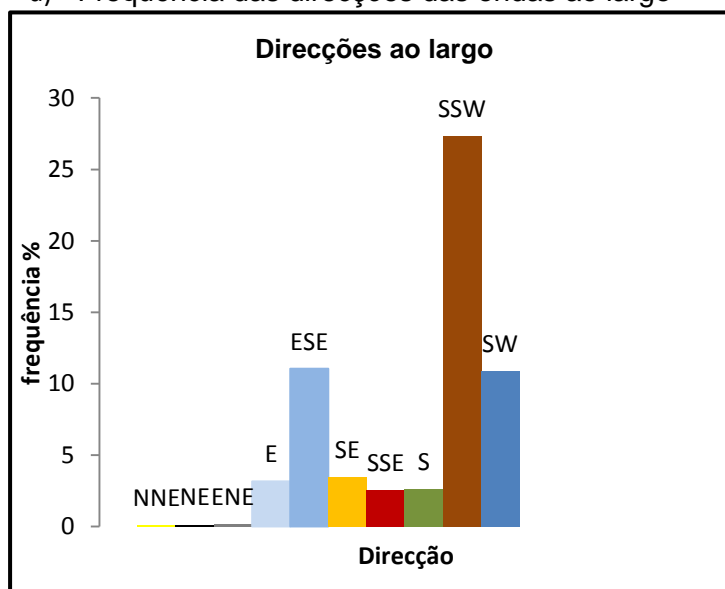
Dir	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SSW	SSW	SSW	SW
Dir (°)	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5	180	202.5	202.5	202.5	202.5	225
H <sub>s</sub> (m)	3.3	4	2.55	2.3	3.04	3.0	2.75	2.8	2.66	3.01	3.42	3.08	2.7
T <sub>p</sub> (s)	11	11	7	7	9	9	9	11	11	13	17	19	13

Como resultado desta propagação para o ponto de estudo, verificaram-se as características apresentadas na tabela 5.3 e na figura 5.6 (anteriormente apresentadas) pode-se visualizar as diferenças referentes as direcções ao largo e à 60m de profundidade.

Tabela 5.3: Características do clima médio no ponto de estudo.

Dir <sub>0</sub>	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SSW	SSW	SSW	SW
Dir	ENE	E	E	ESE	ESE	SE	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE
Dir (°)	73.9	82.2	93.1	105	117	133	147	156	165	162	154	150	168
H <sub>s</sub> (m)	1.20	2.17	1.56	1.71	2.71	2.53	2.22	1.96	1.42	1.46	1.76	1.60	0.88
T <sub>p</sub> (s)	9.12	9.25	6.19	6.22	7.86	7.88	7.80	9.08	8.93	10.5	13.9	15.7	10.2

a) Frequência das direcções das ondas ao largo



b) . Frequências das direcções das ondas à 60 m de profundidade.

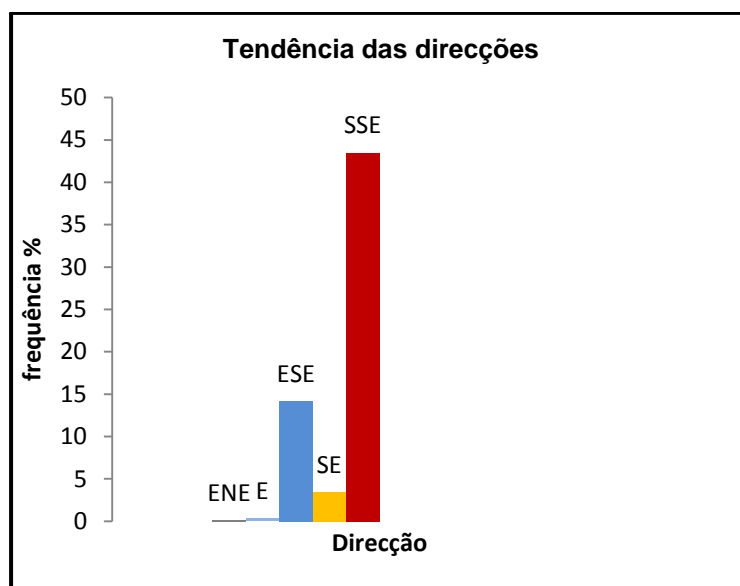


Figura 5.7: Frequências das direcções consideradas na propagação com o modelo SWAN.

a. Ainda para o clima médio propagou-se a característica mais frequente (SSW, 13s) considerando o efeito de vento constante em toda malha. Assumiu-se uma velocidade do vento de 4.5 m/s, de acordo com os dados de regime dos ventos (Langa 2007). Considerou-se nesta propagação, as direcções do vento mais frequentes, nomeadamente: Este, Nordeste e Sudoeste. O resultado desta propagação apresenta-se no Anexo 3. Na tabela 5.4 encontram-se as características das ondas no ponto de estudo propagadas considerando o efeito do vento.

Tabela 5.4: Características da agitação marítima com a inclusão do vento para o ponto em estudo.

Direcção <sub>onda,0</sub>	Direcção <sub>vento,0</sub>	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	Direcção (°)
SSW	----	1.46	10.5	162
SSW	NE	1.56	9.01	158.7
SSW	E	1.41	9.15	160
SSW	SW	1.29	9.43	159.22

b. Propagou-se também a característica mais frequente considerando (SSW, 13s) a variação do nível do mar pelo efeito das marés, considerando as amplitudes de baixa e preia-mar, que ocorrem nas marés vivas obtidas em Langa (2008). Estes valores correspondem a 0.2 m de maré baixa e 3.8 m de maré viva. Os resultados destas propagações no Anexo 4 apresentando-se na tabela 5.5 as características da onda no ponto de estudo.

Tabela 5.5: Características da agitação marítima propagada considerando o efeito das marés.

Tipo	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Direcção (°)
SSW	1.56	10.5	162
Preia – mar	1.57	10.45	162.41
Baixa – mar	1.56	10.46	162.21

- c. Testou-se também a sensibilidade do espectro de frequência (propagando a característica mais frequente) variando o espectro de Jonswap (que é o espectro padrão do modelo SWAN) para o espectro Pierson-Moskowitz a fim de avaliar a diferença entre os resultados de cada um. Os resultados destas propagações no Anexo 5 apresentando-se na tabela 5.6 as características da onda no ponto de estudo e o erro entre estes resultados.

Tabela 5.6: Características da agitação marítima propagada considerando o espectro de frequência de Pierson – Moskowitz.

Tipo	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Direcção (°)
Jonswap	1.46	10.5	162
Espectro PM	1.59	9.65	163.24
Erro (%)	8.2	8.1	0.8

- d. Para o clima extremo propagaram-se para um período de 11s as alturas de onda referentes aos períodos de retorno de 5, 25 e 100 anos, obtidos no estudo de Guiloviça (2011). Nesta propagação consideraram-se as direcções que sofrem menos modificações durante a propagação, já que o clima extremo é para uma situação desfavorável. As características das ondas consideradas nesta propagação apresentam-se na tabela 5.7 e o seu resultado apresenta-se na tabela 5.8.

Tabela 5.7: Características das ondas do clima extremo para propagação com o modelo SWAN.

$T_r$ (anos)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Direcção
5	6.82	11	ENE, E, ESE
25	7.63	11	ENE, E, ESE
100	8.27	11	ENE, E, ESE

Tabela 5.8: Características da agitação marítima do clima extremo no ponto de estudo.

Direcção <sub>0</sub>	T <sub>r</sub> (anos)	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	Direcção
ENE	5	4.09	9.73	93.3
E	5	4.75	9.93	105.8
ESE	5	4.97	10.06	118.15
ENE	25	4.36	9.84	94.55
E	25	5.03	10.07	106.45
ESE	25	5.24	10.20	118.55
ENE	100	4.55	9.92	95.19
E	100	5.21	10.17	106.88
ESE	100	5.42	10.30	118.86

Na propagação com o modelo SWAN existiram também limitações que caso não permitiram uma análise mais sensível deste estudo. Algumas destas limitações deveram-se a factores como:

- A baixa resolução da batimetria que limitou a análise no interior da Baía de Maputo;
- A baixa resolução das malhas de cálculo que pela análise constatou-se que pode provocar diferenças consideráveis principalmente na H<sub>s</sub>;
- A consideração de condições iniciais constantes ao longo de uma fronteira não corresponde a realidade, uma vez que as ondas têm características distintas, em diferentes pontos;
- A dificuldade em definir quando o mar se encontra pouco ou bem desenvolvido, uma vez que há escassez de dados de velocidade do vento ao largo da Baía para se definir o tipo de espectro de frequência mais representativo;
- O vento considerado é o frequente para a região da Baía de Maputo, que é uma área bastante reduzida comparando com a área de estudo (já que são escassos os dados do vento ao largo), e este dificilmente actua de forma constante numa grande área;
- A maré tem maior efeito nas proximidades da costa e dada a dificuldade na resolução da batimetria existente, o seu efeito foi pouco visível;
- Como o modelo SWAN calcula a difracção de forma muito simplificada e restrita torna-se difícil encontrar um resultado que reflecta de maneira aproximada à realidade o seu efeito.

## 6. AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE LONGITUDINAL PELA FÓRMULA DE CERC

Com os resultados encontrados na propagação, como foi mencionado no subcapítulo 2.4, pode-se estudar a dinâmica litoral. A título de exemplo, segue-se uma breve análise do transporte de sedimentos, com enfoque ao transporte longitudinal.

Uma vez que não se dispõe de dados como tamanho do sedimento e pendente do perfil da região em estudo, que são parâmetros de base das formulações de Kamphuis (1991) e Van Rijn (2001) esta avaliação limita-se a formulação de CERC.

E uma vez que a resolução da malha de cálculo do modelo SWAN não permite conhecer as características das ondas na rebentação, que são as que definem o transporte longitudinal, esta análise foi feita somente com os resultados obtidos na propagação Linear.

Para esta análise consideraram-se os resultados da propagação linear do clima médio (ver tabela 4.3) e ainda os seguintes parâmetros:

- O coeficiente de calibração de CERC,  $K = 0.29$  (valor assumido para  $H_s$ );
- A densidade dos sedimentos,  $\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$ ;
- A densidade da água do mar,  $\rho_s = 1030 \text{ kg/m}^3$ ;
- A porosidade do sedimento,  $n = 0.4$ ;
- O coeficiente de rebentação da onda,  $\gamma = 0.78$ .

Os resultados desta análise são os apresentados na tabela 6.1

Tabela 6 1: Taxa potencial de sedimento transportado longitudinalmente ( $\text{m}^3/\text{ano}$ ) na região em estudo.

$T_p$ (s)	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
3	-----	- 0.024	-----	-----	-----	0.031	-----	0.003
5	- 0.615	- 0.126	-----	- 0.770	7.173	21.317	7.812	0.134
7	- 0.986	- 4.750	- 11.797	- 41.506	123.926	210.317	79.650	2.822
9	- 0.063	-1.175	- 14.436	- 36.222	137.827	187.570	58.000	11.680
11	- 0.181	- 6.083	-----	- 2.514	14.702	27.53	15.576	2.582
13	-----	-----	-----	- 3.927	0.142	3.064	110.061	0.252
15	-----	-----	-----	-----	-----	0.007	0.087	0.042
17	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.001
19	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0003

A direcção de transporte norte toma o sinal positivo e a direcção de transporte sul sinal negativo. Assim, da tabela 6.1 pode-se concluir que o transporte dá-se na sua maioria para a direcção norte e a sua taxa potencial total apresenta-se na tabela 6.2.

Tabela 6.2: Transporte longitudinal potencial pela fórmula de CERC.

Transporte longitudinal potencial em m <sup>3</sup> /ano			
Neto	Bruto	Para Sul	Para Norte
896.992	1 147.348	125.178	1 022.170

Os resultados obtidos nesta análise são muito pequenos, devido à carência de alguns dados e limitações da teoria linear para o transporte de sedimentos. A tabela 6.2 apresenta os resultados em Mm<sup>3</sup>/s de um estudo de transporte de sedimentos para a praia de Escuadrón, na região de Bío-Bío no Chile (Diaz et al 2012, em impressão na UPC). Estes resultados servem para comparar as taxas potenciais frequentes de transporte de sedimentos, uma vez que o estudo foi feito considerando várias situações e com uma maior inclusão de dados.

Tabela 6.3: Transporte longitudinal potencial pela fórmula de CERC para a Praia de Escuadrón, Bío-bío, Chile.

Transporte longitudinal potencial em Mm <sup>3</sup> /ano			
Líquido	Bruto	Para Sul	Para Norte
15.8	37.2	9.6	25.6

Comparando a fórmula de CERC com a de Kamphuis e a de Van Rijn, nota-se que a fórmula de CERC não inclui alguns parâmetros importantes no transporte tais como:

- O diâmetro do sedimento;
- A inclinação do perfil da praia;
- O efeito das marés.

Algumas dificuldades desta análise deveram-se a:

- Os resultados desta análise seriam mais sensíveis caso se introduzissem os resultados da propagação com o SWAN como dados de entrada, porém, existe uma dificuldade (com a pouca resolução da batimetria) em conhecer as características da onda na linha de rebentação.
- Devidas as limitações apresentadas na propagação linear e no modelo SWAN não foi possível avaliar a dinâmica litoral no interior da Baía de Maputo;

- Outra grande limitação desta análise deveu-se ao coeficiente de CERC,  $K$ , pois este é um parâmetro muito sensível, que deve ser calibrado para cada caso de estudo.
- Para algumas direcções de propagação, não se verifica o transporte de sedimentos. A direcção SSW é a mais frequente, mas não provoca transporte longitudinal na costa, o que não corresponde a realidade, pois as ondas chegam à costa, ainda que muito modificadas.



## 7. CONCLUSÕES

Depois de uma análise rigorosa dos resultados obtidos neste estudo, avaliou-se a qualidade destes e a partir desta pôde-se identificar as possíveis limitações da análise. Apresentam-se nesta secção as principais conclusões e recomendações desta análise.

Da análise feita a propagação linear da agitação marítima do largo para a costa verificou-se:

- Na profundidade do ponto em estudo (60 m) as ondas com períodos não inferiores à 7 s encontram-se em águas intermédias, e a as suas características (diminuição da altura  $H_s$  e mudança da direcção), modificam-se mais quanto maior é o  $T_p$  da onda;
- As características das ondas apresentam-se no Anexo 1 e constatou-se que ao largo estão entre as direcções NNE e E, tendem a atingir a costa orientadas para Este, sendo está a direcção predominante na rebentação;
- Para  $T_p$  iguais e inferiores a 7 s as ondas tendem a romper na sua maioria em águas intermédias, (nalguns casos também se verifica para  $T_p$  de 9 s), com excepção das ondas provenientes do Sul, que rebentam todas em águas pouco profundas;
- As profundidades de rebentação variam de 0 – 2,60 m, sendo que as ondas provenientes do Sul, apresentam profundidades de rebentação menores (0 – 40 cm), ou seja, rompem muito perto da costa.

De acordo com os resultados da propagação com o SWAN verificou-se:

### a. Clima médio

- No interior da Baía de Maputo, tanto para o clima médio como para o clima extremo, as ondas tendem a ter  $H_s$  similares, não ultrapassando de modo geral um metro (1m), que vai de acordo com os resultados obtidos no estudo de Langa (2007);
- Para a propagação do clima médio as  $H_s$  das ondas reduzem e encontram-se num intervalo de 1 – 3 m, sendo que as provenientes de SW sofrem maior diminuição;
- Os períodos também são modificados encontrando-se num intervalo de 6 – 16 s, em que encontram mais modificadas as ondas com maiores períodos;
- Quanto as direcções verifica-se que as ondas provenientes de SW tendem a desviar-se mais da sua orientação inicial. O resultado desta propagação encontra-se no anexo 2.
- No caso de consideração do efeito do vento, as diferenças nos resultados são insignificantes. No entanto a maior diferença encontrada foi para a combinação

de ondas provenientes de SSW e vento soprando na direcção SW. Este resultado encontra-se no Anexo 3;

- Considerando o efeito das marés, tanto a preia-mar como a baixa-mar, resulta em diferenças pouco notáveis. Este resultado encontra-se no Anexo 4;
- Pelo resultado apresentado na tabela 5.5, verifica-se que variando o espectro existem diferenças, ainda que pequenas, notáveis das características da agitação marítima. Este resultado apresenta-se no Anexo 5.

#### b. Clima extremo

Os resultados da propagação do clima extremo com o modelo SWAN encontram-se no Anexo 6 e verificou-se essencialmente que:

- A onda referente ao período de retorno de 100 anos sofre maior variação na sua altura  $H_s$ ;
- As ondas provenientes de ENE sofrem maiores modificações nas suas características.

As principais diferenças entre os resultados da propagação linear e da propagação com o SWAN são devidas a:

- Comparando os resultados dos dois métodos de propagação utilizados (na ponta Mucombo) verifica-se que as diferenças em termos de altura de onda são pequenas, notando-se maiores variações nas direcções e nos períodos das ondas, sendo que a teoria linear apresenta menor variação destes valores;
- O modelo SWAN considera as modificações das características da agitação marítima devido à influência da batimetria e outros factores como por exemplo a difracção, diferentemente a Teoria Linear que considera basicamente a refracção e o empolamento;
- No modelo SWAN a obtenção de resultados é com base em interpolações entre valores (entre os pontos da malha) dependendo a sua precisão da resolução das malhas escolhidas, enquanto na propagação linear se obtêm resultados continuamente dependendo só das características em águas profundas;
- Na propagação seguindo a Teoria Linear os  $T_p$  das ondas mantêm-se constantes em todo o processo de propagação e só se podem considerar as ondas cujas direcções iniciais atingem a costa.

## 8. FUTURAS LINHAS DE TRABALHO

Os resultados obtidos neste trabalho são úteis para uma boa gestão costeira, uma vez que a partir destes é possível aperfeiçoar os estudos, e ainda propor soluções adequadas para a maior parte dos problemas existentes na costa de Maputo (erosão costeira, bem como um melhor ordenamento do território).

Não obstante será necessário apurar melhor estes resultados uma vez que no decorrer deste estudo foram encontradas dificuldades que já atrás foram citadas (os seus resultados estão condicionados as referidas limitações). Deste modo, propõe-se:

- A realização de estudos baseando-se em dados observados, sem serem modelados, que retratem melhor a realidade;
- Façam-se para cada caso, análises que permitam conhecer melhor as condições do estado do mar para se poder assumir um espectro de frequência representativo para o estudo na região costeira de Maputo;
- O desenvolvimento de rotinas de cálculo e programas que permitam encontrar as características das ondas no ponto de rebentação no modelo SWAN para um melhor estudo da dinâmica sedimentária;
- O registos de dados de ventos e de agitação marítima que permitam fazer-se estudos com valores mais representativos;
- Trabalhar com casos não estacionários, uma vez que as características das ondas são diferentes em cada instante e em cada ponto;
- A devida calibração de parâmetros, como é o caso do coeficiente de CERC, para o estudo do transporte litoral.

## BIBLIOGRAFIA

### - Referências Bibliográficas

1. Andersen, T. L., Frigaard, P. 2007 - Lecture notes for the Course in Water Waves Mechanics, Aalborg University, Dinamarca.
2. Coelho, C. D. B. 2005 - Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para diferentes Intervenções de Defesa Costeira, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Secção Autónoma de Engenharia Civil - Universidade de Aveiro, Aveiro.
3. Google earth. 2012.
4. Guiloviça, C. B. 2011 - Caracterização da agitação marítima ao largo da Baía de Maputo, Tese de licenciatura em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia - Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.
5. Hogueane, A. M. 2007 – Perfil Diagnóstico da Zona Costeira de Moçambique, *Revista de Gestão costeira Integrada*, vol. 7, n. 1, pp 69 – 82.
6. Holthuijsen, L. H. 2007 – *Waves in Oceanic Coastal Waters*. Cambridge University Press. New York.
7. <http://www.overtopping-manual.com>, 20 de Abril de 2012.
8. INE - Portal de dados do País [www.ine.gov.mz/ResourceCenter/Default.aspx](http://www.ine.gov.mz/ResourceCenter/Default.aspx) 15 de Maio de 2012.
9. Kamphuis, J.W. (1991), Alongshore Sediment Transport Rate, *J. Waterway Port, Coastal and Ocean Eng, ASCE*, Vol. 1, n. 17, pp 624-640.
10. Kamphuis, J. 2000 – *Introduction to coastal engineering and management*. Volumen 2. World Scientific. Kingston.
11. Langa, J. V. Q. 2007 - Problemas da zona costeira de Moçambique com ênfase para a costa de Maputo, *Revista de Gestão costeira Integrada*, vol. 7, n. 1, p. 33 – 44.
12. Langa, S. M. G. 2008 - Análise e Previsão de Marés na Baía de Maputo, Tese de licenciatura em Física, Faculdade de Ciências - Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.
13. Liu, Z., Frigaard, P. 2001 - *Generation and Analysis of Random Waves*, Aalborg University, Dinamarca.
14. [macua.blogs.com](http://macua.blogs.com), 17 de Maio de 2012.
15. [majaliwa.tripod.com/geral.htm](http://majaliwa.tripod.com/geral.htm), 20 de Maio de 2012.
16. Marco, D. G. 2005 - Modelado numérico de la propagación del Oleaje. Una Herramienta para la Ingeniería Marítima y la Predicción Operativa. Tese de Doutoramento em Ciências do Mar - Universidade Politécnica de Catalunya, Barcelona.
17. Sampaio, M. J. T. 2008 - Aplicação do modelo SWAN na caracterização da agitação marítima na zona adjacente a Pinheiro da Cruz. Dissertação para

obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

18. USACE (U. S. Army Corps of Coastal Engineer) 1984. Shore Protection Manual (3rd Ed.), U. S. Gov. Print. Office. Estados Unidos da América.
19. Van Rijn, L.C., 2001. Longshore sediment transport. Report Z3054.20, Delft Hydraulics, Delft, Holanda.
20. [www.astropt.com](http://www.astropt.com), 5 de Junho de 2012.
21. [www.gebco.net](http://www.gebco.net), 20 de Maio de 2012.
22. [www.isric.org](http://www.isric.org), 20 de Maio de 2012.
23. [www.lamma.ufjr.br](http://www.lamma.ufjr.br), 15 de Abril de 2012.
24. [www.noaa.gov](http://www.noaa.gov), 10 de Julho de 2012.
25. [www.openhazards.com](http://www.openhazards.com), 27 de Julho de 2012.
26. [www.portosdeportugal.pt](http://www.portosdeportugal.pt), 17 de Maio de 2012.
27. [www.substratoweblog.com.pt](http://www.substratoweblog.com.pt), 17 de Maio de 2012.

#### - **Outra Bibliografia Consultada**

Espino, M., Gironella, X., Grifoll, M., Oliveira, T., Palalane, J. 2011 - Curso de Hidráulica Costeira, 2ª edição. Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.

Langa, J. V. Q. 2003 - Erosão costeira na Cidade de Maputo. Causas. Considerações sobre intervenções de defesa, Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente (Ambientes Costeiros), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Propagação da Agitação Marítima do Largo para a Costa de Maputo.

Aplicação ao Transporte Longitudinal de Sedimentos.

Cristina Viola

---

## ANEXO 1: CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS À 60 M DE PROFUNDIDADE

Tabela 1 (A1-1): Características das ondas à 60 m de profundidade resultantes da propagação linear.

$T_p$ (s)	Direcção (°N)	h (m)	Tipo de águas	$\alpha$ (°N)	H (m)
5	22.5	60.00	Profundas	23.00	2.05
7	22.5	60.00	Profundas	23.00	2.31
9	22.5	60.00	Intermédias	24.14	2.69
11	22.5	60.00	Intermédias	29.20	2.71
3	45	60.00	Profundas	45.03	1.50
5	45	60.00	Profundas	45.03	2.00
7	45	60.00	Profundas	45.03	2.31
9	45	60.00	Intermédias	56.20	2.57
11	45	60.00	Intermédias	47.80	3.81
7	67.5	60.00	Profundas	67.52	2.55
9	67.5	60.00	Intermédias	67.78	3.59
5	90	60.00	Profundas	90.00	1.91
7	90	60.00	Profundas	90.01	2.32
9	90	60.00	Intermédias	90.06	2.75
11	90	60.00	Intermédias	90.28	3.65
13	90	60.00	Intermédias	90.65	3.81
5	112.5	60.00	Profundas	112.49	2.18
7	112.5	60.00	Profundas	112.49	2.57
9	112.5	60.00	Intermédias	112.37	3.02
11	112.5	60.00	Intermédias	111.89	3.15
13	112.5	60.00	Intermédias	111.09	2.98
3	135	60.00	Profundas	134.98	1.50
5	135	60.00	Profundas	134.98	2.31
7	135	60.00	Profundas	134.98	2.81
9	135	60.00	Intermédias	134.62	2.97
11	135	60.00	Intermédias	133.29	2.83
13	135	60.00	Intermédias	131.08	3.33
15	135	60.00	Intermédias	128.54	1.77
5	157.5	60.00	Profundas	157.47	1.84
7	157.5	60.00	Profundas	157.44	2.90
9	157.5	60.00	Intermédias	156.67	2.71
11	157.5	60.00	Intermédias	153.80	2.60

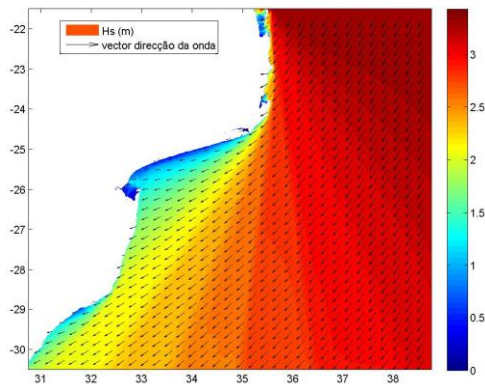
Continuação da tabela 1.

$T_p$ (s)	Direcção	h (m)	Tipo de águas	$\alpha$ (°N)	H (m)
13	157.5	60.00	Intermédias	149.40	2.64
15	157.5	60.00	Intermédias	144.69	1.38
3	180	60.00	Profundas	180.14	1.00
5	180	60.00	Profundas	180.14	2.40
7	180	60.00	Profundas	180.02	2.76
9	180	60.00	Intermédias	177.08	2.23
11	180	60.00	Intermédias	169.79	1.73
13	180	60.00	Intermédias	161.76	1.58
15	180	60.00	Intermédias	154.61	1.29
17	180	60.00	Intermédias	148.57	1.09
19	180	60.00	Intermédias	143.53	0.90



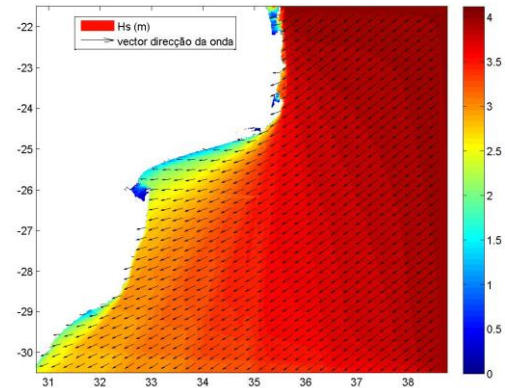
**ANEXO 2: RESULTADOS DA PROPAGAÇÃO DO CLIMA MÉDIO NO MODELO SWAN.**

a)



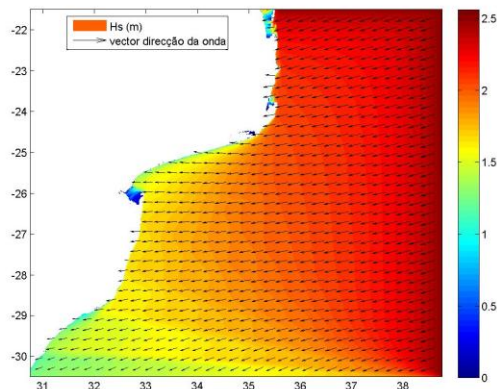
$H_s = 3.3$  m  
 $T_p = 11$  s  
Direcção =  $22.5^\circ$  N

b)



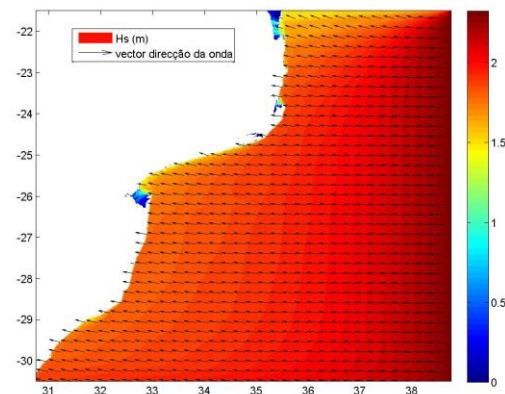
$H_s = 4.0$  m  
 $T_p = 11$  s  
Direcção =  $45^\circ$  N

c)



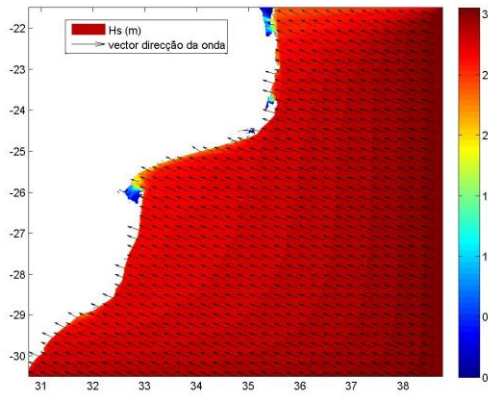
$H_s = 2.55$  m  
 $T_p = 7$  s  
Direcção =  $67.5^\circ$  N

d)



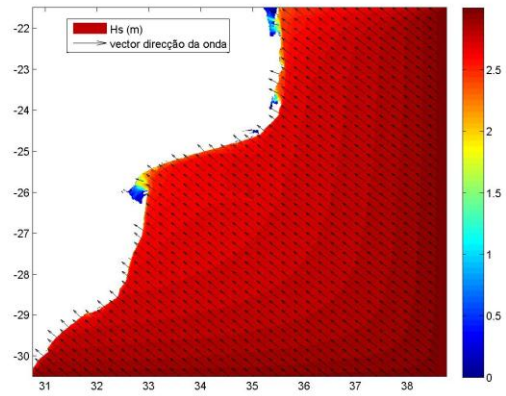
$H_s = 2.32$  m  
 $T_p = 7$  s  
Direcção =  $90^\circ$  N

e)



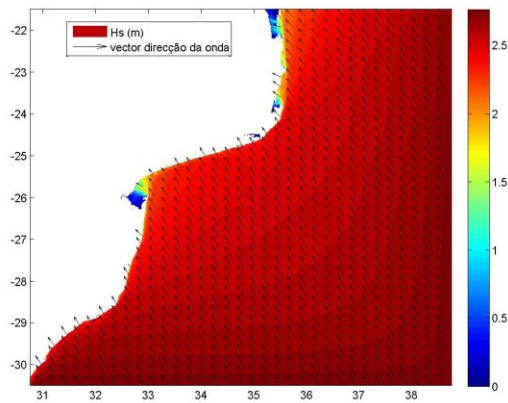
$H_s = 3.04 \text{ m}$   
 $T_p = 9 \text{ s}$   
Direcção =  $112.5^\circ \text{N}$

f)



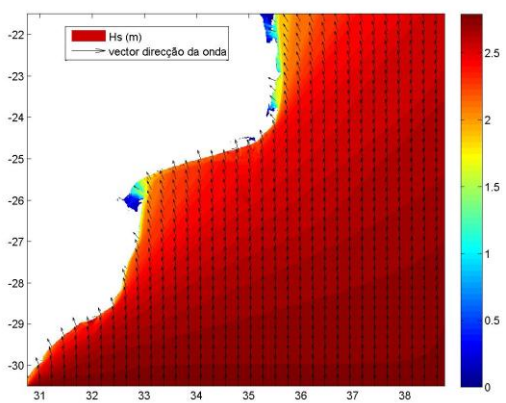
$H_s = 3.0 \text{ m}$   
 $T_p = 9 \text{ s}$   
Direcção =  $135^\circ \text{N}$

g)



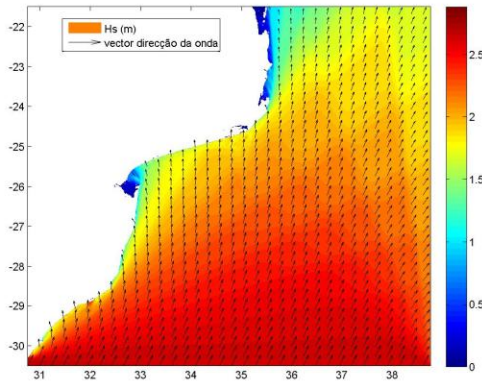
$H_s = 2.75 \text{ m}$   
 $T_p = 9 \text{ s}$   
Direcção =  $157.5^\circ \text{N}$

h)



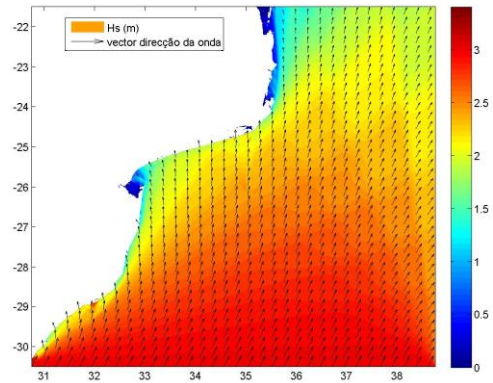
$H_s = 2.8 \text{ m}$   
 $T_p = 11 \text{ s}$   
Direcção =  $180^\circ \text{N}$

i)



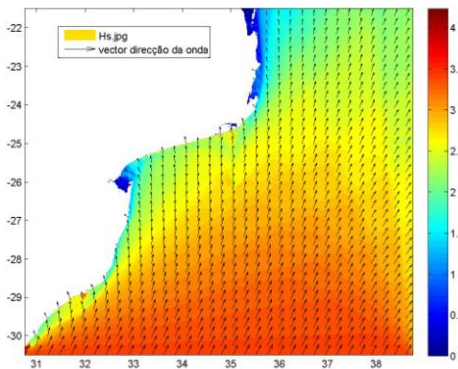
$H_s = 2.66 \text{ m}$   
 $T_p = 11 \text{ s}$   
Direcção = 202.5 °N

j)



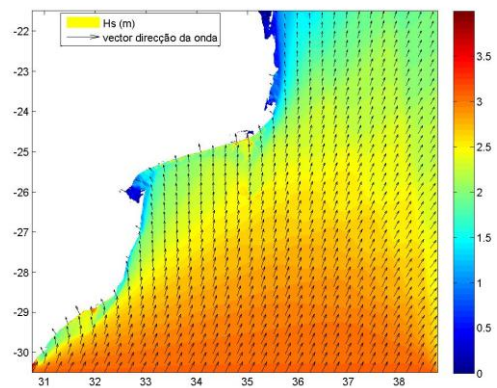
$H_s = 3.01 \text{ m}$   
 $T_p = 13 \text{ s}$   
Direcção = 202.5 °N

k)



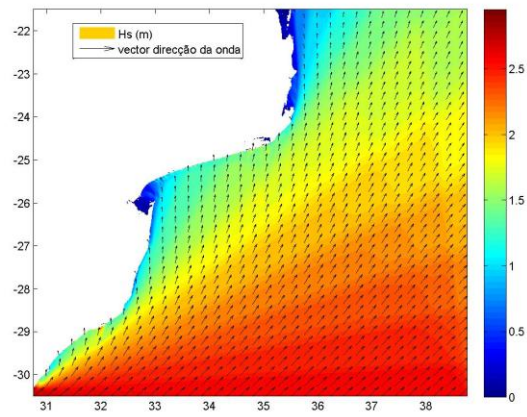
$H_s = 3.42 \text{ m}$   
 $T_p = 17 \text{ s}$   
Direcção = 202.5 °N

l)



$H_s = 3.08 \text{ m}$   
 $T_p = 19 \text{ s}$   
Direcção = 202.5 °N

m)



$H_s = 2.7 \text{ m}$

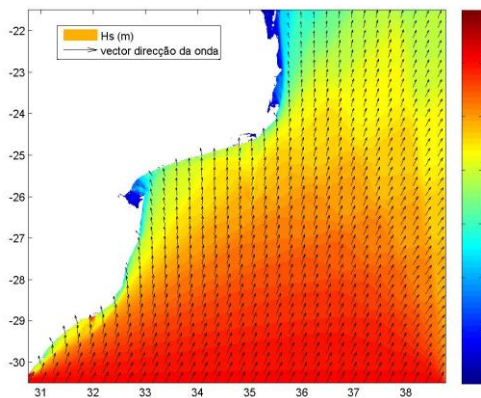
$T_p = 13 \text{ s}$

Direcção = 225 °N



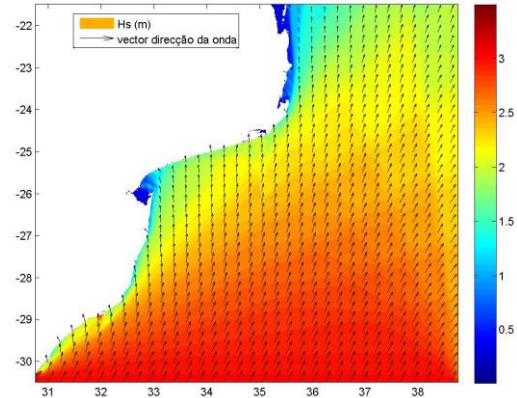
**ANEXO 3: RESULTADOS DA PROPAGAÇÃO DO CLIMA MÉDIO INCLUINDO O VENTO NO MODELO SWAN.**

a)



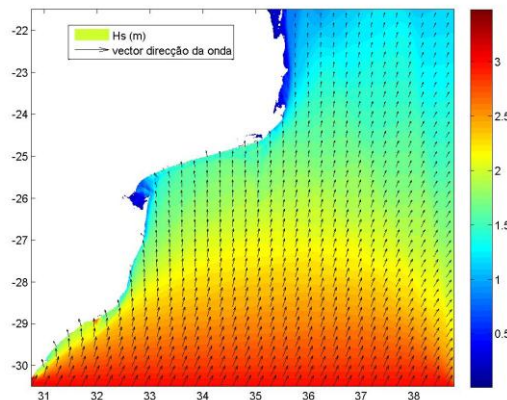
$H_s = 3.01 \text{ m}$	$V_{\text{vento}} = 4.5 \text{ m/s}$
$T_p = 13 \text{ s}$	$\text{Dir}_{\text{vento}} = 45^\circ \text{N}$
$\text{Dir} = 202.5^\circ \text{N}$	

b)



$H_s = 3.01 \text{ m}$	$V_{\text{vento}} = 4.5 \text{ m/s}$
$T_p = 13 \text{ s}$	$\text{Dir}_{\text{vento}} = 90^\circ \text{N}$
$\text{Dir} = 202.5^\circ \text{N}$	

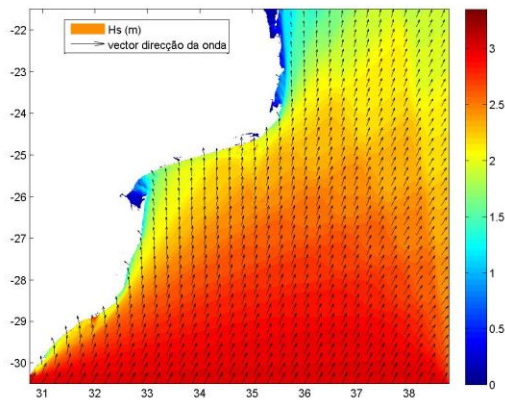
c)



$H_s = 3.01 \text{ m}$	$V_{\text{vento}} = 4.5 \text{ m/s}$
$T_p = 13 \text{ s}$	$\text{Dir}_{\text{vento}} = 225^\circ \text{N}$
$\text{Dir} = 202.5^\circ \text{N}$	

## ANEXO 4: PROPAGAÇÃO DO CLIMA MÉDIO INCLUINDO O EFEITO DAS MARÉS NO MODELO SWAN.

a)



Preia - mar

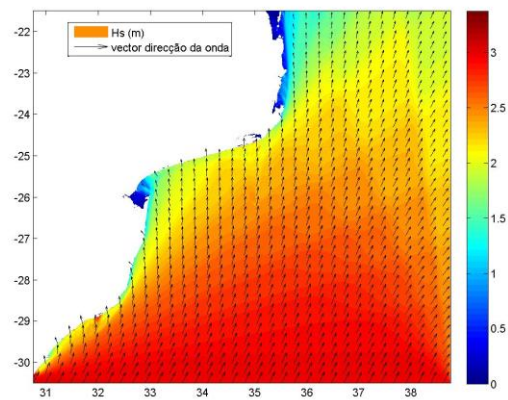
$H_s = 3.01 \text{ m}$

$T_p = 13 \text{ s}$

Dir = 202.5 °N

$a = 3.8 \text{ m}$

b)



Baixa - mar

$H_s = 3.01 \text{ m}$

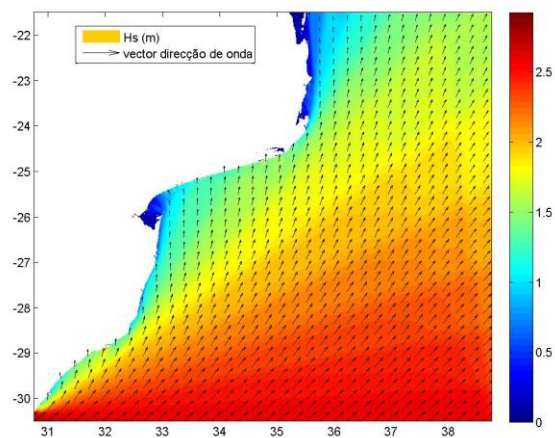
$T_p = 13 \text{ s}$

Dir = 202.5 °N

$a = 0.2 \text{ m}$

## ANEXO 5: RESULTADOS DA PROPAGAÇÃO DO CLIMA MÉDIO PARA O ESPECTRO PIERSON - MOSKOWITZ NO MODELO SWAN.

a)



Espectro PM

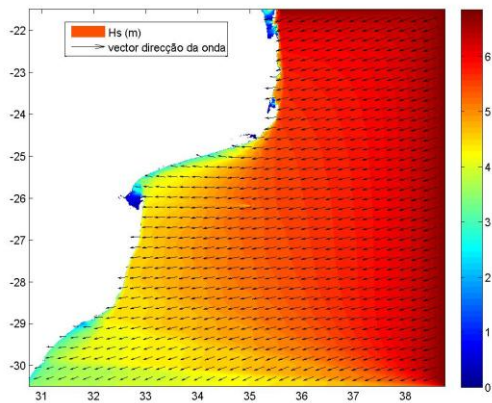
$H_s = 3.01 \text{ m}$

$T_p = 13 \text{ s}$

Dir = 202.5 °N

## ANEXO 6: RESULTADOS DA PROPAGAÇÃO DO CLIMA EXTREMAL NO MODELO SWAN

a)  $T_r=5$  anos

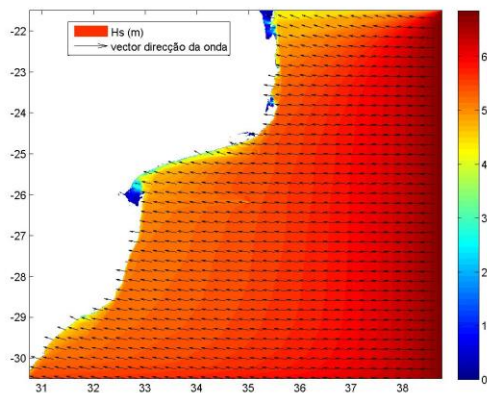


$H_s = 6.82$  m

$T_p = 11$  s

Direcção = 67.5 °N

b)  $T_r=5$  anos

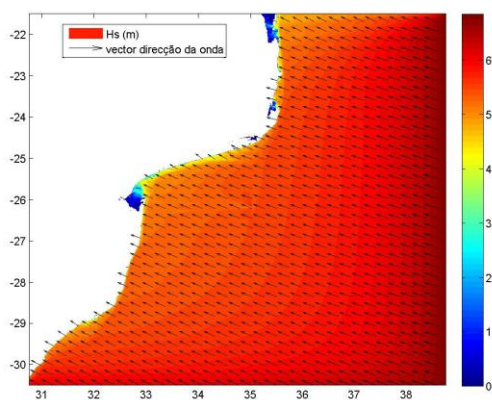


$H_s = 6.82$  m

$T_p = 11$  s

Direcção = 90 °N

c)  $T_r=5$  anos

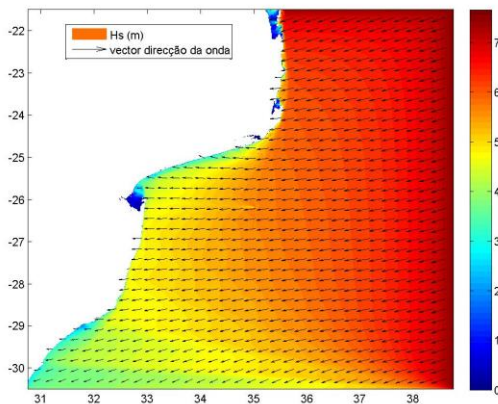


$H_s = 6.82$  m

$T_p = 11$  s

Direcção = 112.5 °N

d)  $T_r=25$  anos



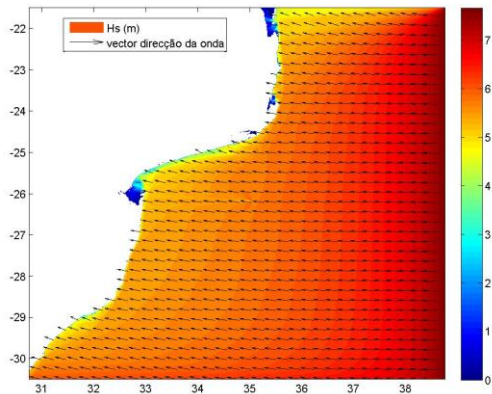
$H_s = 7.63$  m

$T_p = 11$  s

Direcção = 67.5 °N

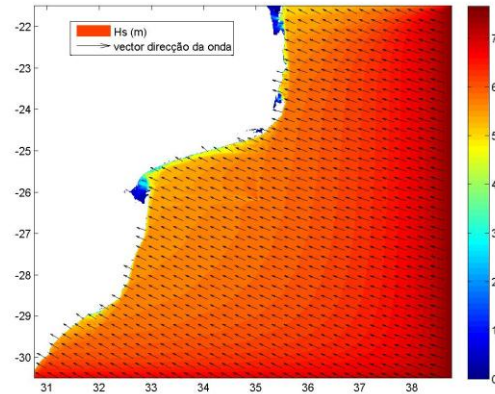


e)  $T_r = 25$  anos



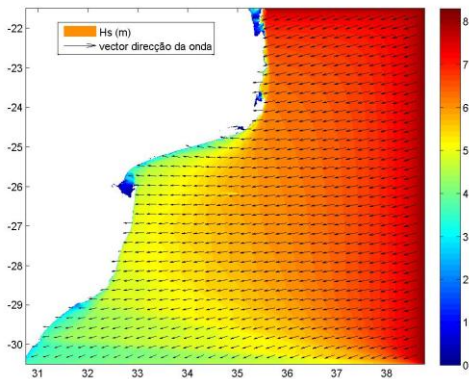
$H_s = 7.63$  m  
 $T_p = 11$  s  
Direcção =  $90^\circ$  N

f)  $T_r = 25$  anos



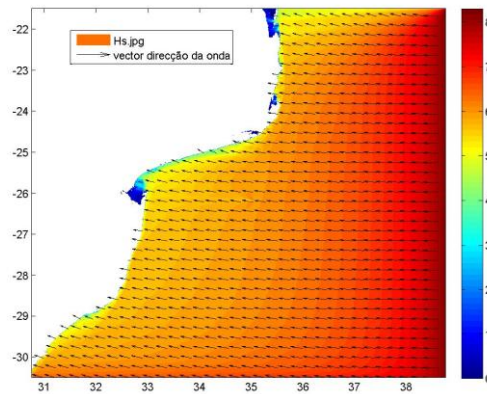
$H_s = 7.63$  m  
 $T_p = 11$  s  
Direcção =  $112.5^\circ$  N

g)  $T_r = 100$  anos



$H_s = 8.27$  m  
 $T_p = 11$  s  
Direcção =  $67.5^\circ$  N

h)  $T_r = 100$  anos



$H_s = 8.27$  m  
 $T_p = 11$  s  
Direcção =  $90^\circ$  N

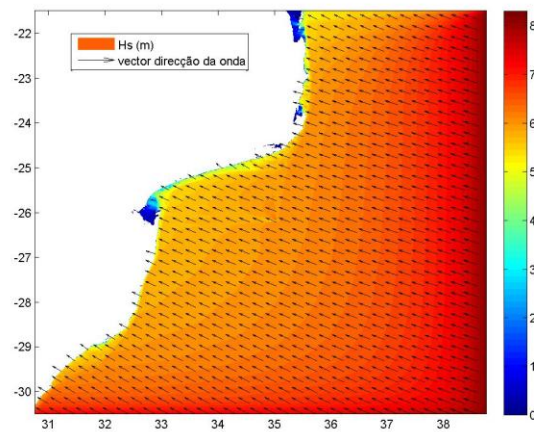
Propagação da Agitação Marítima do Largo para a Costa de Maputo.

Aplicação ao Transporte Longitudinal de Sedimentos.

Cristina Viola

---

i)  $T_r = 100$  anos



$H_s = 8.27$  m

$T_p = 11$  s

Direcção = 112.5 °N