

MODELAÇÃO DE QUEBRAMARES DESTACADOS

GUSTAVO MANUEL SANTOS DA COSTA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto

JUNHO DE 2009

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À minha Família
À Mariana

AGRADECIMENTOS

Antes de mais quero agradecer ao meu orientador Professor Doutor Francisco Taveira Pinto, o apoio prestado ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho, a constante disponibilidade em me receber e me esclarecer qualquer questão no âmbito do projecto, as sugestões e críticas, e o exemplo de competência que sempre transmitiu.

Ao Engenheiro Joaquim Pais Barbosa, do Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos, FEUP, pela grande disponibilidade com que sempre me apoiou na utilização do programa ArcMAP, pela documentação fornecida, e também à Engenheira Raquel Silva pela disponibilização de documentação e auxílio.

Aos colegas da opção de hidráulica, pelo espírito de entreaajuda, e pela boa companhia durante este último ano lectivo.

RESUMO

A modelação numérica do comportamento hidrodinâmico e hidromorfológico de estruturas de defesa costeira, tem sofrido um grande desenvolvimento nos últimos anos face à modelação física. Tem sido cada vez mais utilizada não só pelos menores custos mas também pelos menores tempos de execução dos estudos. O desenvolvimento de *software* como o SMC (Sistema de Modelação Costeira), torna, cada vez mais, a modelação numérica uma ferramenta essencial para o estudo dos efeitos de uma obra de defesa costeira, como os quebramares destacados, na linha de costa em questão, tanto de forma isolada, como complementando possíveis estudos em modelos físicos reduzidos em obras que assim o exijam.

A cidade de Espinho, localizada no litoral oeste português, foi contemplada por uma última intervenção de requalificação em 1997, inserida no Plano Geral de Obras de Protecção. Como resultado desta intervenção, existem hoje em Espinho dois esporões de grandes dimensões. Apesar disso, e com a forte agitação marítima a que está sujeita e a sucessiva redução de fontes aluvionares, os resultados atingidos não coincidiram com as expectativas.

O presente projecto, visa a modelação numérica, utilizando o *software* SMC, de um quebramar destacado, dimensionado por Pereira (2008), que tinha como objectivos a mitigação da erosão da praia adjacente, bem como a retenção de um volume de areia a depositar imediatamente após a sua construção.

No âmbito desta dissertação é inicialmente feita uma breve introdução teórica, focando essencialmente questões hidráulicas relacionadas com os quebramares destacados, e uma exposição das características e potencialidades do *software* utilizado.

Segue-se uma descrição geral do caso de estudo, e a sua modelação numérica, focando os aspectos hidrodinâmicos e hidromorfológicos de toda a linha de costa da frente marítima de cidade de Espinho, inicialmente com a batimetria-base, sendo depois adicionado o quebramar destacado, para diversas simulações que conjugam diversas situações da agitação marítima. É ainda modelada a hipótese de uma alimentação artificial da praia, formando um tómbolo.

Por fim são feitas considerações sobre os resultados obtidos, apontando também as vantagens e desvantagens do *software* SMC. São ainda propostos possíveis estudos futuros, utilizando outros módulos do SMC e referidos aspectos que poderão ser melhorados num seguimento deste trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Quebramar Destacado, Espinho, Modelação Numérica, Software SMC.

ABSTRACT

Numerical modelling of the hydrodynamic and hydromorphological responses of coastal structures has experienced a great development in recent years, especially when compared with physical modelling. Its increasing use reflects both the lower costs that it involves, and the celerity with which it produces good results. The development of software like SMC (Coastal Modelling System) has made numerical modelling even more essential when it comes to studying the effects produced by a coastal structure such as detached breakwaters – both when the study in question is carried out on its own, and as a possible complement to studies in physical models required by important structures.

The latest intervention on the coastline of Espinho, located on the West Atlantic Portuguese coast, was in 1997, as part of the General Plan for Coastal Protection. As a result of this plan, two unusually large groynes were built. However, due to the decrease of sediment supply and under the impact of the energetic sea conditions proper to the northwest coast of Portugal, the results fell short of the initial expectations.

The purpose of this dissertation is to carry out the numerical modelling, using the SMC software, of the detached breakwater that was designed and proposed by Pereira (2008) with a view to attenuating the erosion of the Espinho coastline and allowing for the retention of a volume of sand to be deposited immediately after its construction.

The dissertation opens with a brief introduction, highlighting mainly the hydraulic implications of detached breakwaters, and describing the relevant characteristics and potentialities of the SMC software.

The dissertation continues with a general description of the case study, and its numerical modelling. It focuses on the hydrodynamic and hydromorphological aspects of the Espinho coastline, considered at first with its base bathymetry, and secondly with the detached breakwater already in place. To achieve it, various simulations are made, taking into account diverse sea conditions. Additionally, this study simulates the possibility of an artificial tombolo.

Finally, some closing remarks are made addressing the results that have been obtained and the advantages and disadvantages of the SMC software. The dissertation also points forward to further research, drawing on other modules of the SMC software, and considers the possibility of extensions and improvements of the present study.

KEYWORDS: Detached Breakwater, Espinho, Numerical Modelling, SMC Software.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO	1
----------------------------	----------

2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS QUEBRAMARES DESTACADOS	3
---	----------

2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. OS QUEBRAMARES DESTACADOS	3
2.3. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS QUEBRAMARES DESTACADOS	5
2.3.1. PERFIL TRANSVERSAL TIPO.....	5
2.3.2. Materiais	5
2.3.3. Parâmetros Funcionais	5
2.3.4. Funcionamento Hidráulico.....	6
2.3.5. Impactes Causados pelos Quebramares Destacados.....	8

3. ASPECTOS HIDRÁULICO-ESTRURAIS INFLUENCIADORES DO COMPORTAMENTO DE QUEBRAMARES DESTACADOS	9
--	----------

3.1. INTRODUÇÃO	9
3.2. PRAIA EM EQUILÍBRIO	9
3.2.1. FORMA PARABÓLICA DE EQUILÍBRIO DE HSU E EVANS	10
3.2.2. FORMULAÇÃO DE TAN E CHIEW	12
3.2.3. ESPIRAL LOGARÍTMICA.....	13
3.3. RESPOSTAS MORFOLÓGICAS AOS QUEBRAMARES DESTACADOS	14
3.4. TRANSMISSÃO DA AGITAÇÃO	16

4. SISTEMA DE MODELAÇÃO COSTEIRA (SISTEMA MODELADO COSTERO - SMC).....	19
---	-----------

4.1. DESCRIÇÃO GERAL E POTENCIALIDADES DO SOFTWARE SMC	19
--	----

4.2. ESTRUTURA GLOBAL DO SMC	19
4.3. MÓDULO PRÉ-PROCESSO	20
4.4. MÓDULO DE ANÁLISE DE PRAIAS A CURTO PRAZO	21
4.4.1. PETRA	21
4.4.2. MOPLA	21
4.4.2.1. Conceitos Básicos	21
4.4.2.2. Hipóteses e Restrições do Mopla	22
4.4.2.3. Parâmetros Característicos de cada Modelo	25
4.4.2.4. Breve Descrição do Espectro TMA	28
4.5. MÓDULO DE ANÁLISE DE PRAIAS A LONGO PRAZO	30
4.5.1. Conceitos Básicos	30
4.5.2. CONCEITO GEOMÉTRICO DE PRAIA EM EQUILÍBRIO	30
4.5.3. EDITOR DE PRAIA EM EQUILÍBRIO	32
4.6. MÓDULO MODELADOR DO TERRENO (MMT)	33
4.7. MÓDULO TUTOR DE ENGENHARIA COSTEIRA (Tic)	33
 5. CASO DE ESTUDO - QUEBRAMAR DESTACADO PARA A FRENTE MARÍTIMA DE ESPINHO	 35
5.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL	35
5.2. CARACTERÍSTICAS DA OBRA EM ESTUDO	38
5.2.1. QUEBRAMAR DESTACADO	38
5.2.2. AGITAÇÃO MARÍTIMA	39
5.2.3. SEDIMENTOS	41
5.2.4. BATIMETRIA	41
 6. SIMULAÇÕES DO CASO DE ESTUDO	 43
6.1. INTRODUÇÃO	43
6.2. SIMULAÇÕES UTILIZANDO O SOFTWARE MOPLA	44
6.2.1. SIMULAÇÕES COM A BATIMETRIA BASE	44
6.2.2. SIMULAÇÕES REALIZADAS COM QUEBRAMAR DESTACADO	60
6.2.3. SIMULAÇÕES REALIZADAS COM QUEBRAMAR DESTACADO PARA EVENTOS DE 48 E 72 HORAS	76
6.2.4. SIMULAÇÕES COM O QUEBRAMAR DESTACADO E TÔMBOLA	78

7. CONCLUSÕES	85
7.1. SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
7.2. POTENCIALIDADES E DEBILIDADES DO SOFTWARE SMC	86
7.3. SUGESTÕES DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	86
 BIBLIOGRAFIA.....	 89
 ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Molhes do Douro (MOPTC, 2009)	4
Figura 2.2 - Praia de Castell de Ferro em Granada (Google Earth™).....	4
Figura 2.3 - Perfil transversal tipo.....	5
Figura 2.4 - Esquema para formação de saliência ou tómbolo e da acção da refacção (adaptado de French, 2002)	6
Figura 2.5 - Esquema para formação de saliência e tómbolo (adaptado de Abbott <i>et al.</i> , 1994).....	7
Figura 2.6 - Esquema da difracção provocada por um quebramar destacado (adaptado de Silvester <i>et al.</i> , 1997)).....	7
Figura 3.1 - Esquema de baía/praias em equilíbrio segundo a formulação de Hsu e Evans (1989) (adaptado de González Medina, 2001)	10
Figura 3.2 - Influência do estuário e da ilha, impedem a forma de equilíbrio. (González e Medina 2001).....	11
Figura 3.3 - Definição das diferentes zonas geradas por um quebramar destacado (Taveira Pinto, 2007)	11
Figura 3.4 - Esquema elucidativo da relação entre as variáveis α_{min} , β , R_0 e Y (Taveira Pinto, 2007)	12
Figura 3.5 - Comparação entre as duas formulações e a baía real (adaptado de Institution of Civil Engineers, 2002).....	12
Figura 3.6 - Baía de Pánxon, Pontevedra (Google Earth™)	13
Figura 3.7 - Esquema da espiral logarítmica (Yasso, 1965)	13
Figura 3.8 - Variação dos parâmetros adimensionais da forma em planta de equilíbrio para tómbolo (B_k/B , B_1/L) e saliência (Y_0/Y , B_1/L), para diferentes valores do comprimento do quebramar $2B$, da distância do quebramar à linha de costa, Y , e do comprimento de onda, L (Taveira Pinto, 2007)	14
Figura 3.9 - Esquema de definição de um tómbolo (Taveira Pinto, 2007).....	15
Figura 3.10 - Esquema de definição de uma saliência teórica (Taveira Pinto, 2007).....	15
Figura 3.11 - Esquema da transmissão da agitação (adaptado de Angremond <i>et al.</i> , 2004).....	16
Figura 4.1 - Representação esquemática do SMC (manual SMC).....	20
Figura 4.2 - Esquema de contornos que se devem evitar (adaptado de manual Mopla)	23
Figura 4.3 - Zonas válidas de propagação e limite ângulos limite (adaptado de manual Mopla)	23
Figura 4.4 - Esquema geral de malhas e contornos (adaptado do manual SMC).....	24
Figura 4.5 - Comparação do espectro TMA para várias profundidades com o espectro JONSWAP (adaptado de Silvester <i>et al.</i> , 1997).....	29
Figura 4.6 - Esquema geral de polígono Associado a uma praia em equilíbrio (adaptado do manual SMC).....	31

Figura 4.7 - Esquema do perfil de praia (adaptado do manual SMC)	31
Figura 5.1 - a) Vista sobre a marginal a partir do esporão norte, b) vista aérea sobre a cidade e baía de Espinho (Google Earth™)	35
Figura 5.2 - Recuo da costa de Espinho entre 1880-1911 (Mota Oliveira, 1991)	36
Figura 5.3 - Evolução da costa de Espinho entre 1958 e 1988 (adaptado da Mota Oliveira, 1991)	37
Figura 5.4 - Frente Marítima de Espinho em Setembro 2003, Outubro 2006 e Junho 2007 (da esquerda para a direita) (Google Earth™)	38
Figura 5.5 - Representação esquemática do quebramar destacado projectado (Pereira, 2008)	39
Figura 5.6 - Frequência da direcção das ondas registadas na bóia de Leixões (Pereira, 2008)	39
Figura 5.7 - Variação sazonal da altura de onda significativa na Figueira da Foz (Pereira, 2008)	40
Figura 5.8 - Representação do levantamento usado para a modelação (Mota Oliveira, 1991)	41
Figura 6.1 - Representação em duas dimensões da batimetria-base (metros, ao ZH)	44
Figura 6.2 - Representação em três dimensões da batimetria-base (metros, ao ZH)	45
Figura 6.3 - a) Variação espacial das alturas de onda, b) Frentes de onda	47
Figura 6.4 - a) Alturas de onda e frentes de onda sobrepostas, b) Frentes de onda sobrepostas à batimetria	48
Figura 6.5 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Vectores agitação-topografia	49
Figura 6.6 - Variação espacial da fase da onda	50
Figura 6.7 - a) Vectores corrente-magnitude, b) Vectores corrente-topografia	51
Figura 6.8 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Topografia inicial-variação inicial	52
Figura 6.9 - a) Variação da batimetria, b) Topografia final-variação da topografia	53
Figura 6.10 - Espectro de frequências ($H_s=5,0$ metros, período de pico 12 segundos, frequência máxima de 0,20 Hz)	56
Figura 6.11 - Espectro direcciona (N65°W, +/- 25°)	56
Figura 6.12 - Espectro bidimensional a duas dimensões	57
Figura 6.13 - Espectro bidimensional a três dimensões	57
Figura 6.14 - a) Variação espacial das alturas de onda significativas, b) Vectores corrente- magnitude	58
Figura 6.15 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria	59
Figura 6.16 - Representação a duas dimensões da batimetria com o quebramar destacado (metros ao ZH)	60
Figura 6.17 - Representação a três dimensões da batimetria com o quebramar destacado (metros ao ZH)	61
Figura 6.18 - a) Alturas de onda-frentes de onda para a orientação de agitação oeste, b) Alturas de onda-frentes de onda para a orientação da agitação de noroeste	62

Figura 6.19 - a) Variação espacial da fase para a orientação da agitação de oeste, b) Variação espacial da fase para a orientação da agitação de noroeste.....	63
Figura 6.20 - a) Vectores agitação-magnitude para a orientação da agitação de oeste, b) Vectores agitação-magnitude para a orientação da agitação de noroeste.....	64
Figura 6.21 - a) Vectores corrente-magnitude para a orientação da agitação oeste e b) Vectores corrente-magnitude para a orientação da agitação de noroeste.....	65
Figura 6.22 - a) Vectores transporte potencial-magnitude para orientação da agitação oeste e b) Vectores transporte potencial-magnitude para orientação da agitação noroeste.....	66
Figura 6.23 - a) Vectores transporte potencial-magnitude para a situação de nível de maré 0 (ZH) metros e orientação da agitação noroeste, b) Vectores transporte potencial-magnitude para situação de maré 0 (ZH) metros, altura de onda 2 metros e orientação de noroeste	67
Figura 6.24 - Vectores transporte potencial-magnitude para o caso de agitação de oeste, altura de onda 5 metros, maré 0 (ZH) metros e período de 18 segundos	68
Figura 6.25 - a) Variação da batimetria oeste, b) Variação da batimetria noroeste	69
Figura 6.26 - Variação da batimetria caso de maré 0 (ZH) metros, 5 metros de altura de onda, período de 12 segundos e orientação da agitação oeste	70
Figura 6.27 - Variação espacial das alturas de onda significativas	73
Figura 6.28 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Vectores corrente-magnitude	74
Figura 6.29 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria	75
Figura 6.30 - Variação da batimetria para 12 horas.....	77
Figura 6.31 - a) Variação da batimetria para 48 horas, b) Variação da batimetria para 72 horas.....	78
Figura 6.32 - Representação a duas dimensões da batimetria com o quebramar destacado e tómbolo (metros, ao ZH)	79
Figura 6.33 - a) Vectores corrente-magnitude para situação de período 18 segundos, altura de onda 5 metros, nível de maré 0 (ZH) metros e orientação da agitação noroeste, b) Vectores corrente-magnitude para a mesma situação, mas com tómbolo	81
Figura 6.34 - Vectores corrente-magnitude para situação de período de pico de 12 segundos, altura de onda significativa 5 metros, amplitude de maré 4,0 (ZH) metros, orientação da agitação N65°W (+/- 25°) e com tómbolo	82
Figura 6.35 - a) Vectores transporte potencial-magnitude para situação de período de pico de 12 segundos, altura de onda significativa 5 metros, amplitude de maré 4,0 (ZH) metros, orientação da agitação N65°W (+/- 25°) e com tómbolo, b) Variação da batimetria para a mesma simulação.....	83

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Condições-limite para a formação de tómbolo e saliência por vários autores referidos por González e Medina (2001).....	16
Quadro 4.1 - Limitação das Malhas	25
Quadro 5.1 - Valores extremos e médios globais da agitação na Figueira da Foz e em Leixões (adaptado de Pereira, 2008)	40
Quadro 5.2 - Altura de onda máxima compatível com a profundidade, altura de onda significativa e altura de onda média do décimo superior (adaptado de Pereira, 2008).....	41
Quadro 6.1 - Dados considerados nas simulações com a batimetria base, usando agitação regular	45
Quadro 6.2 - Dados considerados nas simulações com a batimetria base, usando agitação irregular	46

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- B - largura do coroamento para D'Angremond, *et al.*, (1996) [m]
- B - metade do comprimento do quebramar destacado segundo González e Medina (2001) [m]
- B_1 - metade do comprimento da linha de costa afectada pela estrutura [m]
- B_k - metade da largura de ligação do tómbolo ao quebramar destacado [m]
- C_0 - coeficiente função de β para a formulação de Hsu e Evans (1989)
- C_1 - coeficiente função de β para a formulação de Hsu e Evans (1989)
- C_2 - coeficiente função de β para a formulação de Hsu e Evans (1989)
- C_f - coeficiente de fricção Bailard (1981)
- D_{50} - diâmetro médio do sedimento [m]
- D_{90} - diâmetro que é superado em 10% do peso [m]
- F_m - frequência de pico para o espectro TMA [hz]
- g - aceleração da gravidade [m/s^2]
- H - altura de onda [m]
- h - profundidade para Soulsby (1997)
- H_i - altura de onda incidente na estrutura para D'Angremond, *et al.*, (1996) [m]
- H_{012} - altura de onda excedida 12 horas por dia num ano [m]
- h_s - altura da estrutura para Seeling (1980) [m]
- H_{rms} - altura de onda média quadrática [m]
- H_{si} - altura de onda significativa para D'Angremond, *et al.*, (1996) [m]
- K_m - número de onda para o espectro TMA
- K_t - coeficiente de transmissão do quebramar destacado
- L - comprimento de onda [m]
- L_m - comprimento de onda para o espectro TMA [m]
- L_{op} - comprimento de onda ao largo [m]
- L_s - comprimento de onda equivalente para o cálculo de cálculo de α_{min} [m]
- NW - orientação noroeste
- P_0 - ponto correspondente ao fim da baía para Hsu e Evans (1989)
- R - raio do ponto de controlo até à linha de costa para Hsu e Evans (1989) [m]
- R_0 - linha de controlo, desde o ponto de controlo até ao fim da baía para Hsu e Evans (1989) [m]
- R_c - submergência do coroamento
- R_u - coeficiente de espraçamento para Seeling (1980)

- s - densidade relativa dos sedimentos para Bailard (1981)
- S - distância da linha de costa original ao quebramar destacado [m]
- s_{op} - declividade da onda em águas profundas
- T - período da onda [s]
- T_{012} - período de onda associado a H_{012} [s]
- T_p - período de pico da onda [s]
- $\bar{U}$ - velocidade média em profundidade [m/s]
- $\bar{u}$ - velocidade no fundo devida à acção da agitação marítima e das correntes para Bailard (1981) [m/s]
- u_{orb} - velocidade orbital [m/s]
- U_{rms} - velocidade orbital quadrática-média [m/s]
- $\vec{u}$ - vector velocidade média integrada na vertical
- $\bar{U}_{cr}$ - velocidade crítica de início de movimento [m/s]
- $\vec{u}_{orb}$ - vector velocidade no fundo devido à agitação
- w_s - velocidade de queda do grão em [m/s]
- W - orientação oeste
- Y - distância desde o ponto de controlo até à linha de costa [m]
- Y_0 - largura teórica da saliência [m]
- Y_s - largura efectiva da saliência [m]
- z_0 - rugosidade do fundo
- ZH - zero hidrográfico [m]
- α - valor tabelado dependente da direcção da onda incidente Tan e Chiew (1994)
- α_{min} - parâmetro de cálculo de Hsu e Evans (1989) [°]
- β - ângulo entre o ponto de difracção e a linha de controlo para Hsu e Evans (1989) [°]
- β_r - constante do método González e Medina (2001) para o cálculo de α_{min} [°]
- θ - ângulo entre a frente de onda e as linhas de controlo para Hsu e Evans (1989) [°]
- ν - viscosidade cinemática [m²/s]
- Φ - ângulo de atrito interno dos sedimentos [°]
- $\vec{q}_{b0}$ - transporte pelo fundo sobre leito plano para Bailard (1981)
- $\vec{q}_{bs}$ - transporte pelo fundo devido ao efeito da pendente do fundo para Bailard (1981)
- $\vec{q}_{s0}$ - transporte em suspensão em suspensão sobre leito plano para Bailard (1981)
- $\vec{q}_{ss}$ - transporte em suspensão devido ao efeito da pendente do fundo para Bailard (1981)
- $\vec{q}_t$ - transporte total pelo fundo e por suspensão nas direcções x e y para Bailard (1981)
- ε_B - factor de eficiência do transporte pelo fundo

ε_s - factor de eficiência do transporte em suspensão

$\vec{\tau}$ - tensão tangencial no fundo em $[N/m^2]$

Acordes - Análise de curto prazo de praias

Arpa - Análise de médio e longo prazo de praias

Atlas - Módulo de cotas de inundação

Baco - Módulo de batimetrias e cartas náuticas da costa

Copla-MC - Modelo de correntes em praias induzidas pela rotura de ondas para agitação regular

Copla-SP - Modelo de correntes em praias induzidas pela rotura de ondas para agitação irregular

Eros-MC - Modelo de erosão-acrecção e evolução da batimetria de praias para agitação regular

Eros-SP - Modelo de erosão-acrecção e evolução da batimetria de praias para agitação irregular

MMT - Módulo modelador do terreno

Mopla - Módulo de agitação, correntes e evolução morfológica de uma praia

MOPTC - Ministérios das Obras Públicas, Transportes e Comunicações

Odín - Módulo de ajuda à caracterização da agitação

Oluca-MC - Modelo parabólico de propagação de agitação regular

Oluca-SP - Modelo parabólico de propagação de agitação irregular

Petra - Módulo de evolução do perfil transversal de praia

SMC - Sistema de modelação costeira

Tic - Tutor de engenharia costeira

1

INTRODUÇÃO

O presente trabalho corresponde à dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, ramo de especialização em Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, ministrado pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no ano lectivo de 2008/09 e elaborada pelo aluno Gustavo Manuel Santos da Costa, sob orientação do Professor Doutor Francisco Taveira Pinto.

Esta dissertação tem como objectivos a modelação de quebramares destacados através do *software Sistema Modelado Costero (SMC)* que faz parte de um projecto intitulado *Modelo de Ayuda a la gestión del Litoral*, desenvolvido pelo grupo de engenharia oceanográfica e costeira da Universidade da Cantábria, para a Direcção de Costas do Ministério do Ambiente Espanhol. O estudo irá incidir sobre alguns dos módulos deste programa, nomeadamente o SMC, MMT e o Mopla. O caso de estudo corresponde à frente marítima da cidade de Espinho, usando a proposta dimensionada por Graciela Pereira em *Projecto de um Quebramar Destacado de Protecção para a frente marítima de Espinho*. no âmbito do projecto de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Ramo de Hidráulica, do sub-ramo de Estudos Costeiros e Marítimos, sob orientação do Professor Doutor Francisco Taveira Pinto e co-orientação do Professor Doutor Fernando Veloso Gomes da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no ano lectivo de 2007/2008.

O projecto está dividido em sete capítulos. Após este capítulo introdutório, no capítulo 2, *Características Gerais de Quebramares Destacados*, é feita, tal como o nome indica, uma descrição sumária deste tipo de estruturas, focando aspectos como a sua utilidade enquanto estruturas de defesa costeira, alguns aspectos do seu funcionamento hidráulico e também questões ligadas aos impactes que estes têm sobre a zona onde se implantam.

O capítulo 3, *Aspectos Hidráulico-Estruturais Influenciadores do Comportamento de Quebramares Destacados*, diz respeito aos aspectos hidráulicos relacionados com os quebramares destacados, apresentando os que poderão ser estudados e modelados com recurso ao *software SMC*, como diferentes equações para a forma de equilíbrio de uma praia.

O capítulo 4, *Sistema de Modelação Costeira (Sistema Modelado Costero - SMC)*, sintetiza os aspectos essenciais do *software SMC*, salientando as potencialidades deste, e descrevendo os vários módulos, sendo que aqueles que serão usados neste trabalho são expostos de forma mais completa, focando também, quando necessário, as expressões em que se baseia o cálculo automático realizado pelo *software*.

O capítulo 5, *Caso de Estudo - Quebramar Destacado para a Frente Marítima de Espinho*, contempla um breve enquadramento do caso de estudo, o caso da frente marítima de Espinho, assim como uma descrição dos dados da agitação, das características sedimentares da área, e do quebramar a modelar

proposto por Graciela Pereira em *Projecto de um Quebramar Destacado de Protecção para a frente marítima de Espinho* (2008). São também descritos alguns dados batimétricos e o seu tratamento para serem inseridos no programa SMC, usando o *software* ARCMaP da *Environmental Systems Research Institute* (ESRI).

O capítulo 6, *Simulações do Caso de Estudo*, refere-se às várias simulações efectuadas, tendo por base o projecto já referido, começando pela situação real em que não existe quebramar destacado implantado, partindo depois para a solução proposta por Pereira (2008). Irão ser feitos comentários relativos aos resultados das diversas simulações, comparando-os e também analisando a influência das diferentes variáveis, tanto na resposta da batimetria real, como na resposta com o quebramar destacado. As simulações serão de dois tipos, com agitação regular e irregular, usando as potencialidades do Mopla. Será também estudada a proposta de alimentação artificial de um tómbolo proposta por Pereira (2008).

No capítulo 7, *Conclusões*, são apresentadas as relações dos resultados obtidos, efectuados alguns comentários acerca das potencialidades e limitações do programa utilizado, sendo também expostas algumas sugestões de investigações a realizar, no seguimento do presente trabalho.

Finalmente, nos *Anexos*, são apresentados os resultados das simulações discutidas no capítulo 6.

2

CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS QUEBRAMARES DESTACADOS

2.1. INTRODUÇÃO

A acção das ondas, correntes e ventos, é responsável pelos processos de erosão e acreção, que moldam a linha de costa. No entanto, quando o homem começou a construir cada vez mais próximo da linha de costa, a usar as areias para construção e a construir barragens, que pararam ou fizeram diminuir o transporte de sedimentos dos rios que alimentavam as praias, o fenómeno da erosão tornou-se cada vez mais problemático. Outro aspecto importante é também a crescente subida do nível médio da água do mar, o que ainda agrava mais o problema referido.

Por outro lado, Portugal tem no turismo uma importante parte do seu produto interno bruto, e grande parte desta fatia está relacionada com as zonas balneares, um pouco por todo o continente (especialmente no Algarve e Alentejo) e também nas ilhas.

Na costa arenosa Portuguesa, o avanço do mar tem sido acentuado, o que leva à necessidade da construção de estruturas de protecção costeira. Os quebramares destacados, assim como outras estruturas de protecção costeira, poderão ter um papel importante na estabilização dos processos de transporte de sedimentos, protegendo o litoral. Neste capítulo irão ser descritos de uma forma geral algumas características dos quebramares destacados assim como o seu funcionamento hidráulico.

2.2. OS QUEBRAMARES DESTACADOS

Os quebramares destacados são utilizados como estruturas de protecção de áreas portuárias, de recreio e piscatórias, para melhorar áreas balneares aumentando o perímetro de praia, assim como podem também exercer funções de guiamento de correntes, de confinamento/protecção de estuários e de fixação de canais de navegação como é o caso dos recentes molhes do Douro. Existem sob a forma emersa e submersa, podendo tomar várias posições em relação à linha de costa conforme o objectivo e orientação principal da agitação.

Têm tido, nos últimos anos, um importante impulso pois, apesar de serem mais caras e de mais difícil execução, poderão ser mais eficazes na fixação dos sedimentos e protecção da linha de costa, do que os mais usuais esporões perpendiculares à linha de costa.

O seu funcionamento hidráulico passa por provocar a rebentação da onda incidente, a qual começa por originar, a sotamar, a formação de uma zona de forte turbulência, a que se segue, posteriormente, a reformulação do movimento ondulatório, com ondas de menor altura e menor período (Taveira Pinto, 2007).

Na figura 2.1. e figura 2.2., são apresentados exemplos de alguns quebramares destacados, cada um com funções distintas. No primeiro exemplo (figura 2.1.), está representado o caso já referido dos molhes do Douro, em que o quebramar da margem esquerda é considerado como sendo destacado, com função de protecção do cabedelo e da margem direita do estuário, que em conjunto com o quebramar/molhe da margem direita, confinam e fixam o canal de navegação, permitindo a entrada na embocadura de embarcações sem que sejam afectadas por constantes mudanças na forma do canal. No exemplo da figura 2.2., existe um sistema de quatro quebramares destacados, com funções mais próximas do caso de estudo que irá ser modelado neste trabalho, em que o objectivo das estruturas é proteger a linha de costa da acção do mar, mas também aumentar a linha de praia, melhorando as condições para a prática balnear. Para além do exemplo dos molhes do Douro existem ainda outros exemplos deste tipo de estruturas no nosso país, como o caso do quebramar destacado de Castelo de Neiva, da Aguda e em Lajes do Pico.



Figura 2.1 - Molhes do Douro (MOPTC, 2009)



Figura 2.2 - Praia de Castell de Ferro em Granada (Google Earth™)

2.3. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS QUEBRAMARES DESTACADOS

2.3.1. PERFIL TRANSVERSAL TIPO

Na figura 2.3. está representado um exemplo possível esquema de perfil transversal de um quebramar destacado. Em geral, a secção de um quebramar destacado não é muito diferente de um quebramar de taludes, contendo os seguintes elementos:

- Manto Resistente - zona exposta dos taludes que recebe a acção directa da agitação, composta por duas fiadas de blocos naturais (enrocamento) ou artificiais (por exemplo Antifer™);
- Manto Intermédio - destinado a evitar a saída dos finos do núcleo, é constituído por fiadas de diâmetros decrescentes na direcção do interior do quebramar. Podem ser usados materiais geossintéticos do tipo geotêxtil para ajudar a realizar esta função;
- Núcleo - zona interior do quebramar constituída por T.O.T.;
- Risberma - remate inferior da base do manto resistente que o suporta e evita infra-escavações.

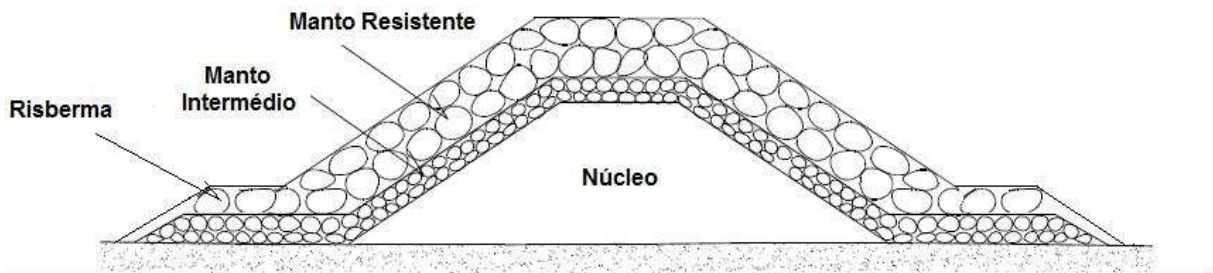


Figura 2.3 - Perfil transversal tipo

2.3.2. MATERIAIS

O material mais usado na construção de quebramares destacados é o enrocamento. Isto acontece sobretudo pelo seu custo mais acessível quando comparado com blocos de betão, e porque quando de boa qualidade, o enrocamento é mais resistente que o betão à agitação e também tem maior durabilidade. Outra vantagem importante do enrocamento, se for de características geológicas semelhantes aos materiais da zona de intervenção, é a possibilidade de reduzir os impactes ambientais negativos pois poderá permitir a fixação de espécies marinhas, criando um novo habitat no quebramar.

Na falta de material de enrocamento na zona de intervenção, terão de ser idealizadas soluções em betão, como tetrápodes, blocos cúbicos, ou blocos Antifer™, entre outros tipos de blocos patenteados. A utilização de geossintéticos é também importante pois pode servir para proteger a base do talude das infra-escavações, assim como também se aplicam para separar as várias camadas do talude.

2.3.3. PARÂMETROS FUNCIONAIS

Juntamente com as condições de agitação do local em questão, os parâmetros funcionais são determinantes para a eficácia de uma qualquer estrutura de defesa costeira. A submergência do coroamento e o coeficiente de transmissão são dois exemplos destes parâmetros. Para o seu conhecimento é essencial avaliar as características físicas locais, como a batimetria, as cotas de

fundação e a profundidade de implantação, a direcção dominante do transporte de sedimentos, as características destes, a direcção e a intensidade dos ventos dominantes, e também as alturas e períodos de onda. A própria estrutura apresenta parâmetros estruturais, sendo os mais importantes o comprimento longitudinal, a distância à linha de costa, o afastamento entre quebramares, se se tratar de um sistema de quebramares destacados, e ainda a cota e largura do coroamento.

Estes dados estabelecem o grau de submergência de projecto da estrutura, igual à diferença entre a altura do quebramar e o nível máximo de preia-mar de águas vivas. No caso de quebramares emersos este parâmetro vai ser positivo e consequentemente no caso de quebramares submersos negativo. A maior eficácia da estrutura em termos de transmissão da energia para sotamar dependerá deste valor, pois está relacionado com os galgamentos admitidos. Terá de ser também analisada a questão das grandes amplitudes de maré, pois poderá ser determinante em termos paisagísticos e de estabilidade.

2.3.4.FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO

Os quebramares destacados podem ser, como já foi referido, de grande interesse para a economia local em termos turísticos, pois poderão melhorar em vários aspectos a zona balnear, quer seja no aumento desta área ou na melhoria do grau de defesa contra a acção do mar. Os quebramares destacados proporcionam uma redistribuição do padrão de transporte de sedimentos, de modo a criar a configuração de praia desejada (Taveira Pinto *et al.*, 2003). As correntes de difracção criadas nas extremidades do quebramar promovem o reajustamento dos sedimentos, propagando-se desde a estrutura até à linha de costa. A acumulação de sedimentos poderá ser de dois tipos. O tómbolo corresponde a uma saliência de sedimentos que se prolonga até ao quebramar, o que, dependendo do pretendido, poderá ser ou não benéfico, visto que pode interromper o transporte longitudinal de sedimentos para as praias vizinhas. Poderá também formar-se uma saliência mais curta que não atinge o quebramar ou até uma dupla saliência, sendo esta última mais rara, surgindo apenas em situações muito específicas.

Nas figuras 2.4., 2.5. e 2.6. estão representados, esquemas da formação de saliências e tómbolos, assim como esquemas para a difracção das ondas.

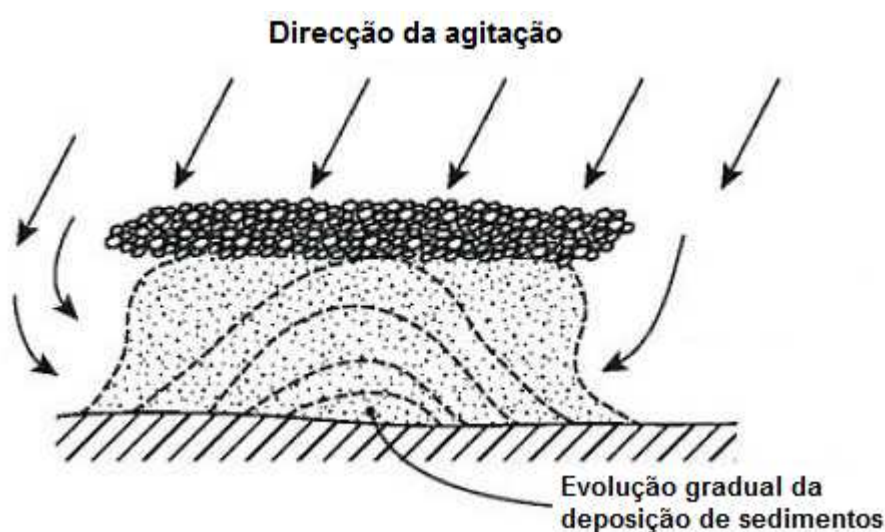


Figura 2.4 - Esquema para formação de saliência ou tómbolo e da acção da refração (adaptado de French, 2002)

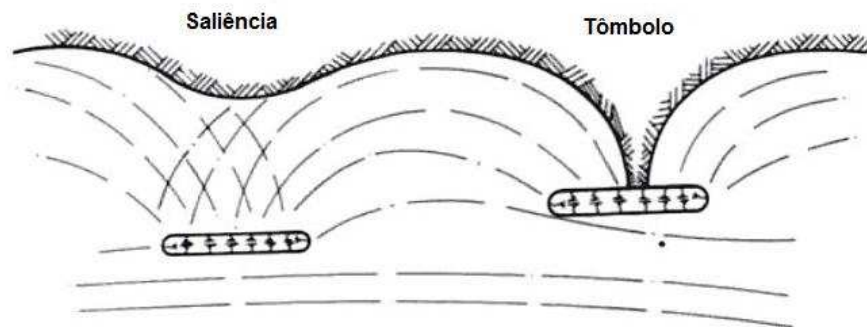


Figura 2.5 - Esquema para formação de saliência e tombolo (adaptado de Abbott *et al.*, 1994)

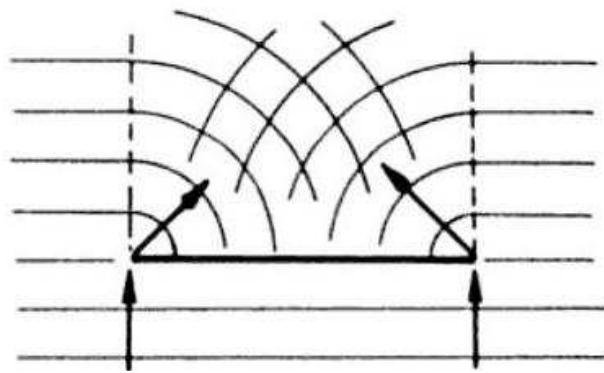


Figura 2.6 - Esquema da difracção provocada por um quebramar destacado (Silvester *et al.*, 1997)

Existem vários estudos sobre a capacidade de retenção de sedimentos por parte do quebramar. Na sua generalidade estes relacionam a distância da estrutura à linha de costa, a declividade da onda, o crescimento da cota de coroamento acima do nível médio da água e o comprimento do quebramar com a sua capacidade para reter os sedimentos. Coates *et al.* (1995), obteve resultados relativamente à capacidade de retenção de sedimentos, face ao transporte longitudinal existente. Verificou que a eficiência do quebramar aumenta com a declividade da onda H_s/L_m , com o crescimento da cota do coroamento acima do nível médio da água ($R_c=1.5, 0.5, -0.5$ m) e com o comprimento do quebramar (entre 60 e 120 m), e que se mantém constante para distâncias à linha de costa entre 90 a 120 m (Taveira Pinto, 2007). Toyoshima (1974), referido por, Herbich (2000), estudou diversos quebramares destacados no Japão, país com um significativo número de estruturas deste tipo, e concluiu que para se obter um tombolo, a distância da estrutura até a linha de costa original dividida pelo comprimento total do quebramar destacado não deverá ser inferior a 0,74. O mesmo autor também encontrou uma relação entre o comprimento de onda e o comprimento do quebramar destacado, sendo que este deve ser duas a seis vezes superior ao comprimento de onda ou estar entre 61 e 198 metros, enquanto que a distância entre quebramares deverá ser pelo menos um comprimento de onda ou entre 20 a 50 metros. Finalmente, Toyoshima (1974), também concluiu que não só existe um aumento de volume sedimentar a sotamar do quebramar, mas também a barlamar.

É importante salientar que o dimensionamento hidráulico não pode ser desligado do dimensionamento estrutural. É necessária uma correcta articulação entre os dois de forma a que todas as variáveis envolvidas no dimensionamento estrutural, tais como o peso unitário dos blocos do manto resistente,

as cotas do coroamento e da fundação, largura de coroamento, e inclinação dos taludes também sejam incluídas no dimensionamento hidráulico para definir parâmetros como por exemplo a distância à costa e o seu comprimento.

No capítulo 3 irão ser desenvolvidos alguns destes os aspectos hidráulicos dos quebramares destacados.

2.3.5.IMPACTES CAUSADOS PELOS QUEBRAMARES DESTACADOS

A construção de um quebramar destacado provoca diversos impactes na zona circundante, que vão desde os impactes hidrodinâmicos e bio-morfológicos, até aos sócio-económicos e paisagísticos. Neste ponto irá ser feita uma breve descrição destes tipos de impactes.

Com a implantação do quebramar destacado, as correntes sofrem alterações, e a agitação é afectada, sendo que as ondas são essencialmente difractadas e refractadas. Outro aspecto importante no que diz respeito à hidrodinâmica é o facto de, por vezes, especialmente se o quebramar for emerso, acontecer uma estagnação das águas a sotamar, o que é negativo para a prática balnear. Este problema não é tão marcante se o quebramar for submerso, pois os galgamentos originam a recarga de água a sotamar da estrutura. Pode também ocorrer a formação de correntes complexas e remoinhos que podem tornar perigosa a prática balnear. A mitigação deste problema é por vezes difícil, pois mesmo usando modelos reduzidos, ou modelos numéricos de previsão dos planos de difracção e refracção, estes fenómenos apresentam grande complexidade.

Apesar de um quebramar destacado permitir a manutenção de sedimentos colocados através de alimentação artificial e acumular sedimentos por difracção, também pode originar erosões na direcção da corrente longitudinal da costa em questão. No entanto este fenómeno será menos acentuado que no caso de esporões, que reduzem com maior eficiência o transporte sedimentar longitudinal. As correntes junto às cabeças dos quebramares destacados podem criar erosões localizadas, e infra-escavação dos fundos, sendo este aspecto mais marcante se se tratar de um sistema de quebramares destacados, onde as pequenas aberturas entre eles provocam maiores velocidades. Os quebramares destacados poderão também criar novos habitats, proporcionando a fixação de novas espécies, tanto marinhas como espécies de aves marítimas. A já referida questão da estagnação das águas a sotamar da estrutura poderá promover a proliferação de espécies de algas que poderão diminuir a qualidade das praias para a prática balnear, devido à turvação das águas e a odores desagradáveis.

Em termos paisagísticos, é importante ter em conta na fase de dimensionamento que os quebramares destacados conduzem, em geral, a um impacte visual negativo. Este efeito poderá ser minorado se se considerarem maiores submergências e se forem utilizados materiais naturais como o enrocamento em vez de blocos de betão. Os impactes sócio-económicos são em geral positivos, pois a construção de uma estrutura deste tipo melhora as condições balneares, o perímetro de praia, e uma melhor protecção das construções junto à linha de costa. Contudo estes aspectos terão que ser previstos na fase de projecto, pois a construção de um quebramar destacado de grandes dimensões e com materiais desapropriados, poderá, apesar da melhoria das condições balneares, piorar a componente paisagística já referida, e isso ser reflectido em termos sociais e económicos nas populações da zona perto da costa.

3

ASPECTOS HIDRÁULICO - ESTRUTURAIS INFLUENCIADORES DO COMPORTAMENTO DE QUEBRAMARES DESTACADOS

3.1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, tem-se intensificado o estudo de quebramares destacados, pelo que vários métodos e expressões semi-empíricas têm sido desenvolvidos. O efeito mais investigado, associado aos quebramares destacados, é a relação entre a acreção em projecto, em particular, a resposta morfológica (saliência ou tómbolo) e os parâmetros estruturais. Usando recursos como os modelos reduzidos e os protótipos, ou a modelação numérica, com apoio em *software* como, por exemplo, o SMC, o conhecimento sobre a interacção das praias com os quebramares destacados tem vindo a ser melhorado, designadamente em relação às alterações morfológicas e formas de equilíbrio estático a sotamar das estruturas.

Neste ponto irão ser descritos alguns conceitos necessários à aplicação do *software* SMC, como por exemplo o de praia em equilíbrio, assim como aspectos gerais do funcionamento hidráulico dos quebramares destacados, as configurações de tómbolo ou saliência e a transmissibilidade da agitação.

3.2. PRAIA EM EQUILÍBRIO

Uma praia arenosa em equilíbrio estático é o único em estado que se pode manter constante sem ter necessidade de reforço de sedimentos num ambiente de agitação constante e em qualquer parte do mundo. Por isso, e tendo em conta que em muitas partes do globo, a erosão costeira é um problema crescente, foi necessário aplicar formulações empíricas que permitam salvaguardar as praias que poderão ficar sem qualquer alimentação sedimentar, permitindo uma mais eficiente gestão costeira. Esta previsão, ao definir a forma de equilíbrio estático permite avaliar a influência de estruturas destacadas na evolução morfológica de uma praia ao conhecer os planos de difracção e ao avaliar a acumulação sedimentar a sotamar da estrutura.

Irá agora ser descritas de forma breve, as formulações de praia em equilíbrio usadas no *software* SMC.

3.2.1. FORMA PARABÓLICA DE EQUILÍBRIO DE HSU E EVANS

A formulação de Hsu e Evans (1989) poderá ser considerada como a mais usada mundialmente para verificar a estabilidade de uma praia, não tendo ainda, no entanto, sido aplicada ao caso de Espinho nem testada para as condições de agitação da costa Portuguesa. Nesta hipótese (figura 3.1.) a forma de equilíbrio é dependente da obliquidade da onda incidente, β (ângulo entre o ponto de difracção e a linha de controlo), e da linha de controlo R_0 . A equação da forma em planta da praia, encontra-se representada na equação (3.1), em que C_0 , C_1 e C_2 representam coeficientes função de β (Hsu e Evans 1989). R corresponde ao raio do ponto de controlo (ponto de difracção), até à linha de costa, segundo ângulos θ que terão necessariamente de ser superiores a β . R_0 é a linha desde o ponto de controlo até ao fim da baía (ponto P_0), local onde a tangente à linha de costa é paralela à crista das ondas incidentes. (R, θ) e (R_0, β) são as coordenadas polares de um ponto genérico na curva de praia.

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \left(\frac{\beta}{\theta} \right) + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta} \right)^2 \quad (3.1)$$

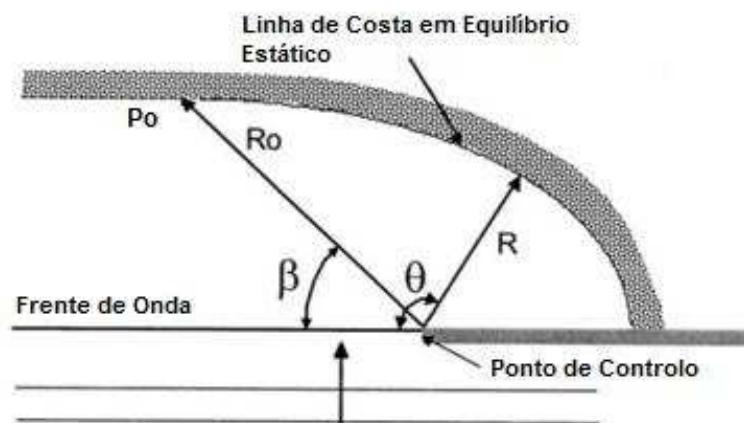


Figura 3.1 - Esquema de baía/praiia em equilíbrio segundo a formulação de Hsu e Evans (1989) (adaptado de González e Medina, 2001)

Segundo González (1995), referido por González e Medina (2001), que testou esta formulação em casos reais, existem algumas limitações. Apesar de ser aplicável tanto quando existem grandes ou pequenas amplitudes de maré, este método não é preciso junto a estuários devido às dinâmicas fluviais locais. Outro aspecto a ter em conta é a impossibilidade de existirem pequenas ilhas que possam influenciar localmente a praia. Na figura 3.2. é apresentado um exemplo destas limitações, a praia El Puntal em Santander.

Quando a onda se refracta e difracta num ponto de controlo (num quebramar destacado no caso), os seus efeitos são sentidos a sotamar de forma diferente dependendo da zona em questão. Poderão surgir três zonas de características distintas, representadas na figura 3.3. Na região 1 o quebramar não produz qualquer efeito na agitação, os gradientes de variação da altura de onda são praticamente nulos, permanecendo por isso as frentes de onda praticamente invariáveis. Já na região 2 existem gradientes de variação da altura de onda, onde estas sofrem apenas o efeito da refacção; na região 3 como é facilmente compreendido existem também gradientes de variação da altura de onda e a rotação das frentes de onda devido ao efeito conjunto da difracção com a refacção. (Taveira Pinto, 2007).

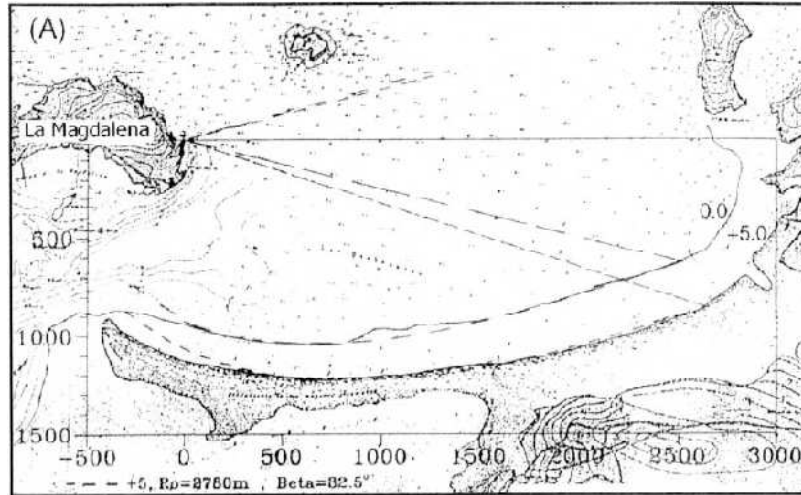


Figura 3.2 - Influência do estuário e da ilha, impedem a forma de equilíbrio. (González e Medina, 2001)

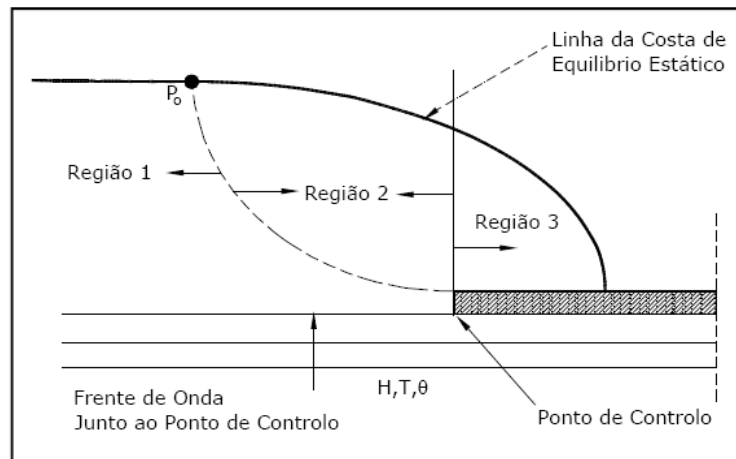


Figura 3.3 - Definição das diferentes zonas geradas por um quebramar destacado (Taveira Pinto, 2007)

A linha de costa de equilíbrio estático é essencialmente definida pelos parâmetros $\alpha_{\min}$, β , e pela distância da estrutura à linha de costa, Y , figura 3.4. Para encontrar o ponto P_0 , já definido anteriormente, numa praia real, teria de ser conhecido o ângulo e $\alpha_{\min}$ a distância Y desde o ponto de controlo até à linha de costa. Este ângulo, de difícil definição em praias reais por depender muito da refração e da difração, foi medido em 26 praias espanholas, tanto mediterrânicas como atlânticas, tendo sido obtida por Hsu e Evans (1989) a expressão empírica para o $\alpha_{\min}$ (expressão 3.2). L_s corresponde a um comprimento de onda equivalente e é definido com base na altura de onda excedida 12 horas por ano, H_{012} , associada a um período T_{012} e na profundidade de água em preia-mar junto à estrutura destacada, d . A constante β_r é igual a 2,13 para as praias espanholas estudadas.

$$\alpha_{\min} = \arctan \left[\frac{\left(\frac{\beta_r^4}{16} + \frac{\beta_r^4 Y}{2 L_s} \right)^{1/2}}{\frac{Y}{L_s}} \right] \quad (3.2)$$

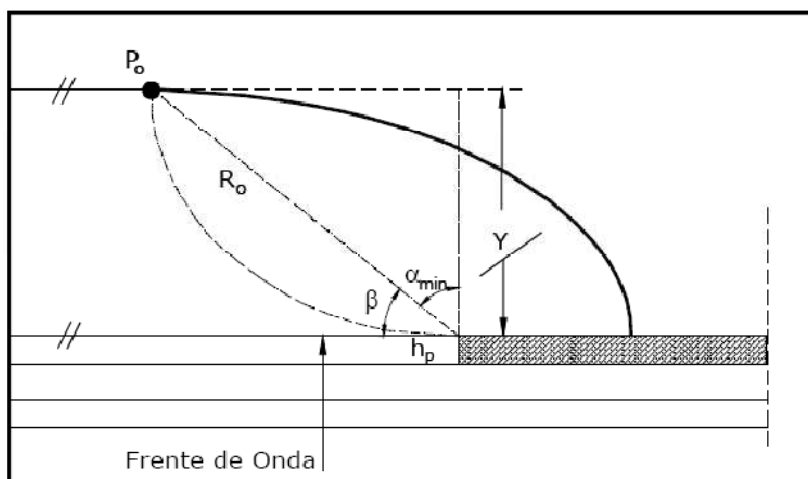


Figura 3.4 - Esquema elucidativo da relação entre as variáveis $\alpha_{\min}$, β , R_0 e Y (Taveira Pinto, 2007)

3.2.2. FORMULAÇÃO DE TAN E CHIEW

A formulação de Tan e Chiew (1994), referido por Institution of Civil Engineers (2002), é uma adaptação da formulação de Hsu e Evans (1989), em que, com base no facto da praia ser paralela à crista da onda incidente em P_0 , propuseram a seguinte expressão:

$$\frac{R}{R_0} = [1 - \beta \cot \beta + \alpha] + [\beta \cot \beta - 2\alpha] \left(\frac{\beta}{\theta} \right) + \alpha \left(\frac{\beta}{\theta} \right)^2 \quad (3.3)$$

em que α é um coeficiente dependente da direcção incidente β , valor tabelado por Hsu e Evans (1989). O número de graus de liberdade da equação passou de três (C_0, C_1, C_2) para apenas um (α). Ambas as formulações foram aplicadas a diversos casos sendo que Tan e Chiew (1994) obteve melhores resultados. Como exemplo de aplicação a caso real, a praia de Pánxon, Pontevedra, Espanha, figuras 3.5. e 3.6., onde foi feita a comparação entre as duas formulações de equilíbrio. Como se vê na figura 3.5., a diferença entre as duas hipóteses é pequena e a aproximação de Tan e Chiew está mais próxima da forma real.



Figura 3.5 - Comparação entre as duas formulações e a baía real (adaptado de Institution of Civil Engineers, 2002)



Figura 3.6 - Baía de Pánxon, Pontevedra (Google Earth™)

3.2.3. ESPIRAL LOGARÍTMICA

Esta equação foi inicialmente proposta por Krumbein (1944), referido em Hsu *et al.* (2008), sendo mais tarde aplicada por Yasso (1965), referido em Hsu *et al.* (2008), em quatro baías naturais nos Estados Unidos da América, tendo descoberto que nem sempre o centro destas espirais coincidia com o ponto de difracção das ondas. A figura 3.7. representa um esquema simples da espiral logarítmica de Yasso. Silvester (1970), referido em Hsu *et al.* (2008), mostrou, utilizando modelos físicos, que o rácio R_2/R_1 e α se iam alterando ao longo da modificação da praia desde o equilíbrio estático até à erosão. Este método apesar de ser pouco preciso, foi muito usado durante as três décadas que sucederam à sua publicação em 1965 (Hsu e Evans, 1989).

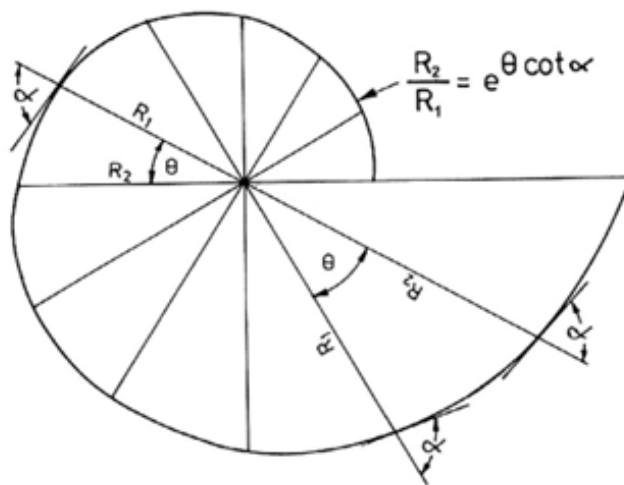


Figura 3.7 - Esquema da espiral logarítmica (Yasso, 1965)

3.3. RESPOSTAS MORFOLÓGICAS AOS QUEBRAMARES DESTACADOS

Como já foi referido de forma resumida no ponto referente ao funcionamento hidráulico, existem três morfologias de resposta possíveis para a costa, sob o efeito de uma estrutura destacada, o tómbolo, a saliência e a dupla saliência. Se a distância do quebramar à linha de costa é suficientemente pequena, e o quebramar é extenso, em relação ao comprimento de onda da agitação incidente, os sedimentos acumular-se-ão atrás do quebramar, pelo crescente avanço da linha de costa para barlar, e assim se formar-se-á um tómbolo (Taveira Pinto, 2007). As variáveis a considerar nesta hipótese, proposta por González e Medina (2001), são o comprimento do quebramar $2B$, a distância deste à linha de costa Y , e também o comprimento de onda L que define o $\alpha_{\min}$. $2B_1$, B_k e $\alpha_{\min}$ podem ser conseguidos usando a formulação atrás descrita da forma de equilíbrio parabólica. Na figura 3.8. é apresentado o ábaco com as soluções para estas variáveis. No caso de o quebramar estar afastado da linha de costa e de ter um reduzido comprimento, quando comparado com a altura das ondas incidentes, será de esperar a formação de uma saliência. As variáveis serão, as mesmas que no caso do tómbolo, sendo desconhecida a largura da saliência Y_0 , que também é conhecida recorrendo ao ábaco desenvolvido por González e Medina (2001). As figuras 3.9. e 3.10. representam esquemas de definição tanto do tómbolo como da saliência.

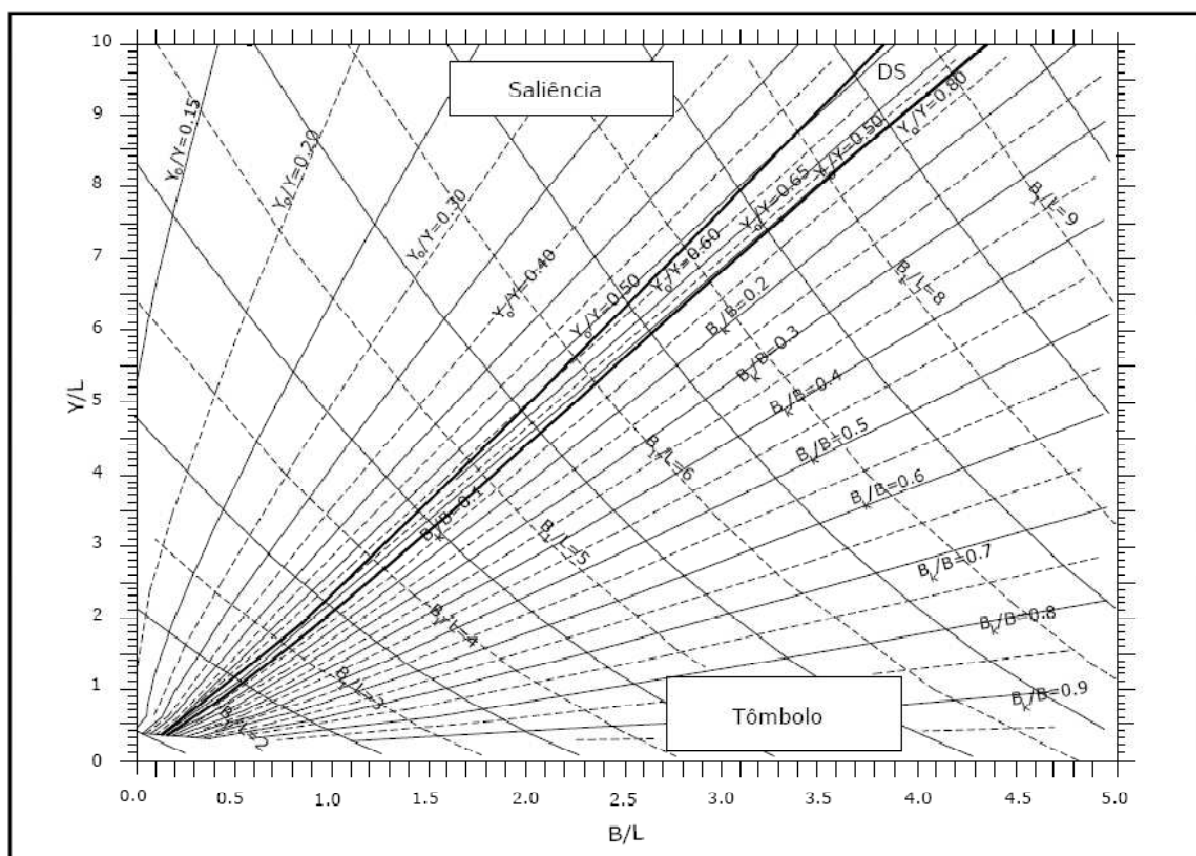


Figura 3.8 - Variação dos parâmetros adimensionais da forma em planta de equilíbrio para tómbolo (B_k/B , B_1/L) e saliência (Y_0/Y , B_1/L), para diferentes valores do comprimento do quebramar $2B$, da distância do quebramar à linha de costa, Y , e do comprimento de onda, L (adaptado de González e Medina, 2001)

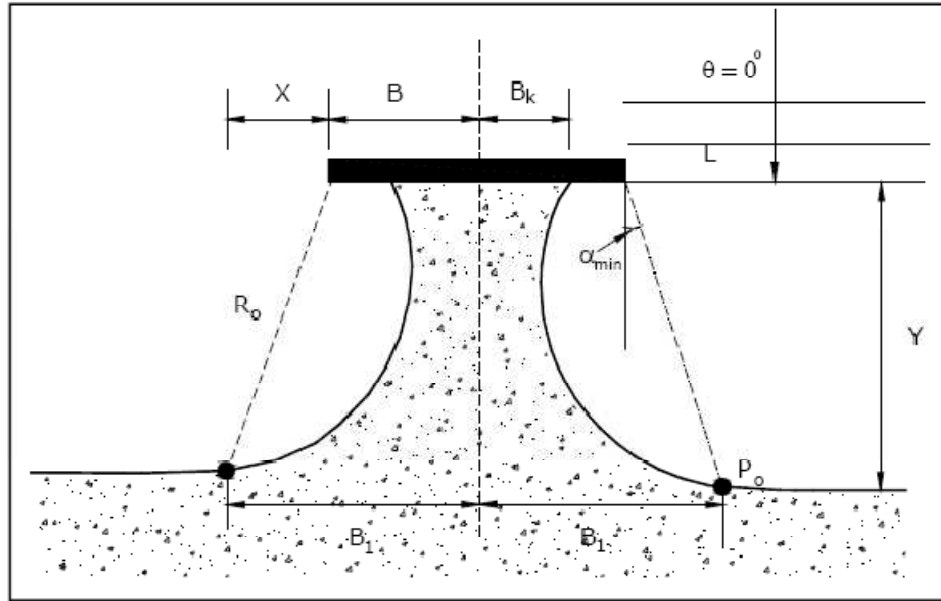


Figura 3.9 - Esquema de definição de um tómbolo (adaptado de González e Medina, 2001)

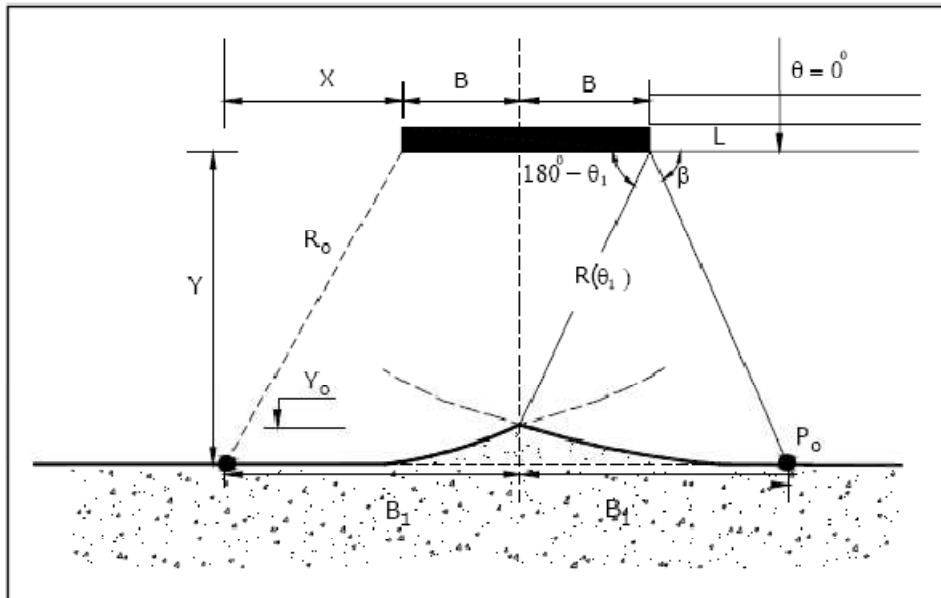


Figura 3.10 - Esquema de definição de uma saliência teórica adaptado de González e Medina, 2001)

É contudo importante referir que a forma da saliência apresentada é uma formulação teórica, sendo necessário converter a forma teórica na forma que realmente acontece. A expressão 3.4 desenvolvida por González e Medina (2001), permite calcular a largura efectiva da saliência, Y_s , conhecida a largura teórica, Y_0 . A curva é válida apenas para $0,3 < B/L < 1,5$ e $2,0 < Y/L < 4,0$.

$$\frac{Y'}{2B} = 0,5 \left(\frac{2B}{Y} \right)^{-\sqrt{2}} \quad (3.4)$$

Vários autores apresentaram propostas sobre as condições-limite de formação do tômbolo e da saliência, que estão expostas no quadro 3.1. González e Medina (2001) refere que a disparidade de valores poderá ter origem no facto de alguns autores darem pouca importância às características da onda (por exemplo o parâmetro Y/L). S representa a distância do quebramar destacado à linha de costa original.

Quadro 3.1 - Condições-limite para a formação de tômbolo e saliência por vários autores, referidos por González e Medina (2001).

Condição	Forma	Autor
$2B/S > 0,67$ até $1,0$	Tômbolo	Gourlay (1981)
$2B/S > 2,0$	Tômbolo	SPM (1984)
$2B/S > 1,5$ até $2,0$	Tômbolo	Dally e Pope (1986)
$2B/S > 1,0$	Tômbolo	Suh e Dalrymple (1987)
$2B/S < 0,4$ até $0,5$	Saliência	Gourlay (1981)
$2B/S = 0,5$ até $0,67$	Saliência	Dally e Pope (1986)
$2B/S < 1,5$	Saliência bem desenvolvida	Ahrens e Cox (1990)
$2B/S < 0,8$ até $1,5$	Pequena Saliência	Ahrens e Cox (1990)
$2B/S < 1,0$	Sem Tômbolo	Suh e Dalrymple (1987)
$2B/S < 1,0$	Sem Tômbolo	SPM (1984)

3.4. TRANSMISSÃO DA AGITAÇÃO

O coeficiente de transmissão, K_t , figura 3.11, é um parâmetro fundamental para o dimensionamento hidráulico de quebramares destacados que tem sido estudado por vários autores, como van der Meer e Daemen (1994), Seeling (1980) e D'Angremond, van der Meer e De Jong (1996), estando os dois últimos referidos e incluídos no módulo Tic do SMC. Estes estudos têm por base ensaios em modelo reduzido e também comparações com medições de campo e são relações empíricas com características específicas, sendo que existem algumas para quebramares permeáveis, outras para impermeáveis, e nestes a transmissão acontece pelo coroamento da estrutura ao ser galgada.

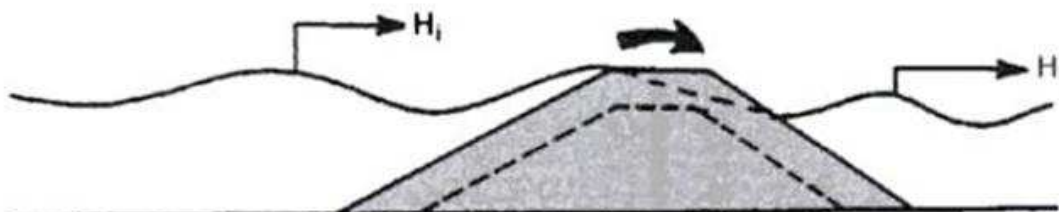


Figura 3.11 - Esquema da transmissão da agitação (adaptado de Angremond *et al.*, 2004)

Seeling (1980) reformulou um estudo empírico realizado por Cross e Sollit (1971) com recurso a ensaios de laboratório a duas dimensões. Esta formulação, resulta num valor do coeficiente de transmissão por galgamento, assumindo então a estrutura impermeável. Como cálculo intermédio é preciso calcular o espraimento sobre a estrutura que depende do tipo de talude. O espraimento é um parâmetro que define a altura que atinge a agitação sobre a estrutura, fundamental para determinar a cota máxima do quebramar destacado. A expressão de K_t para este autor é dada por:

$$K_t = C \left(1 - \frac{F}{R_u} \right) \quad (3.5)$$

$$C = 0,51 - 0,11 \frac{B}{h_s} \quad (3.6)$$

em que B representa a largura do coroamento, h_s a altura da estrutura, F é igual a h-d, isto é, a altura que recebe a agitação na estrutura, e R_u o coeficiente de espraimento (Ahrens e McCartney, 1975; Ahrens e Titus, 1985).

D'Angremond, van der Meer e De Jong (1996) propuseram uma expressão para estruturas permeáveis:

$$K_t = -0,4 \frac{F}{H_{si}} + 0,64 \left(\frac{B}{H_{si}} \right)^{-0,31} (1 - e^{-0,5I_{rp}}) \quad (3.7)$$

válida para $0,075 < K_t < 0,8$, em que H_{si} representa a altura de onda significativa, F , $I_{rp} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_s}{L_{po}}}}$, e L_{po} comprimento de onda ao largo associado ao período de pico.

Propuseram também outra expressão para estruturas impermeáveis válida nos mesmos limites:

$$K_t = -0,4 \frac{F}{H_{si}} + 0,8 \left(\frac{B}{H_{si}} \right)^{-0,31} (1 - e^{-0,5I_{rp}}) \quad (3.8)$$

Estas fórmulas proporcionam um valor para o coeficiente de transmissão tanto por galgamento como através da estrutura. Os autores consideraram que não existem suficientes dados que permitam incluir a dependência do diâmetro nominal e do tipo de blocos usados, nas expressões de K_t .

Outro estudo, van der Meer e Daemen (1994), tem em consideração o diâmetro nominal dos blocos do manto resistente, D_{n50} , na estimativa de K_t , expressão (3.9) reveladora de um desvio padrão desprezável, em relação aos casos estudados, de 0,05. Esta formulação, tem em consideração a altura de onda incidente na estrutura, H_i , o comprimento de onda ao largo, $L_{op} = \frac{gT^2}{2\pi}$, a submergência do coroamento, R_c , e a largura do coroamento, B. Com as variáveis apresentadas estabelece relações para a definição do coeficiente K_t , em função da declividade, $s_{op} = \frac{H_i}{L_{op}}$, e da influência de outros factores, nomeadamente, R_c/D_{n50} .

$$K_t = a \frac{R_c}{D_{n50}} + b \quad (3.9)$$

$$a = 0,031 \frac{H_i}{D_{n50}} - 0,024 \quad (3.10)$$

$$b = -5,42s_{op} + 0,0323 \frac{H_i}{D_{n50}} - 0,017 \left(\frac{B}{D_{n50}} \right)^{1,84} + 0,51 \quad (3.11)$$

A aplicação destas fórmulas é válida para intervalos de K_t entre 0,075 e 0,75 e para valores de declividade de onda, s_{op} , entre 0,01 e 0,05.

4

SISTEMA DE MODELAÇÃO COSTEIRA (SISTEMA MODELADO COSTERO - SMC)

4.1. DESCRIÇÃO GERAL E POTENCIALIDADES DO SOFTWARE SMC

O *Software Sistema Modelado Costero* (SMC) faz parte de um projecto intitulado *Modelo de Ayuda a la gestión del Litoral*, desenvolvido pelo grupo de engenharia oceanográfica e costeira da Universidade de Cantábria, para a Direcção de Costas do Ministério do Ambiente Espanhol. Constitui uma interface gráfica integrante de um conjunto de modelos numéricos desenvolvidos pelo projecto referido.

Este *software* proporciona uma ferramenta numérica que no âmbito da engenharia de costas permite realizar vários tipos de estudos e projectos, entre eles:

- Criar um projecto de trabalho de uma zona de estudo, a partir de fotos, cartas náuticas e dados de batimétricas;
- Aceder ao Baco, programa que contempla uma base de dados de cartas náuticas do litoral espanhol assim como a sua batimetria, sendo a partir daí possível gerar um projecto de estudo que pode ser completado e combinado com outros dados batimétricos, permitindo depois modelar diferentes situações para o trecho de costa em estudo;
- Gerar projectos com base em fotos, cartas náuticas, permitindo depois prever a forma em planta da costa a longo prazo, comparando situações passadas, presentes e futuras;
- Criar projectos através de dados batimétricos de épocas diferentes, de forma a avaliar situações passadas e presentes, assim como prever situações futuras, função de vários cenários possíveis;
- Obter a batimetria da uma linha de costa a partir de uma carta náutica ou mapa referenciado;
- Aceder a um programa com uma base de dados da agitação do litoral espanhol, permitindo depois gerar os dados necessários à execução dos modelos numéricos do sistema;
- Aceder a informação sobre cotas de inundação em qualquer região do litoral espanhol;
- Executar diferentes modelos numéricos que permitam analisar a curto, médio e longo prazo uma zona em estudo.

4.2. ESTRUTURA GLOBAL DO SMC

O SMC, como já foi referido anteriormente, é constituído por uma série de modelos numéricos, organizados de acordo com as escalas temporais e espaciais dos processos a ser modelados. O SMC é então dividido em cinco módulos fundamentais: *Pre-proceso*, *corto plazo*, *medio y largo plazo*, *modelado del terreno*, e *tutor*. O módulo *Pre-proceso* permite caracterizar e processar a informação de

entrada para os diferentes modelos numéricos. O módulo de análise de *corto plazo* de evolução de praia (Acordes) recorre a ferramentas numéricas que permitem analisar a morfodinâmica de um sistema costeiro numa escala espacial/temporal de curto prazo. Da mesma forma, o módulo de análise *medio y largo plazo* (Arpa) contém ferramentas morfodinâmicas que permitem modelar o sistema numa escala temporal e espacial adequada. O *modelado del terreno* permite modificar os contornos do batimetrias, assim como esporões, o que é essencial para estudar os diferentes cenários do projecto em estudo. Finalmente existe o módulo tutor de engenharia costeira (Tic) que serve de apoio teórico e conceptual para os diferentes modelos numéricos do sistema. Estes módulos podem ser utilizados a partir do módulo central, o módulo *Projecto*. A figura 4.1. corresponde a uma representação esquemática do SMC.

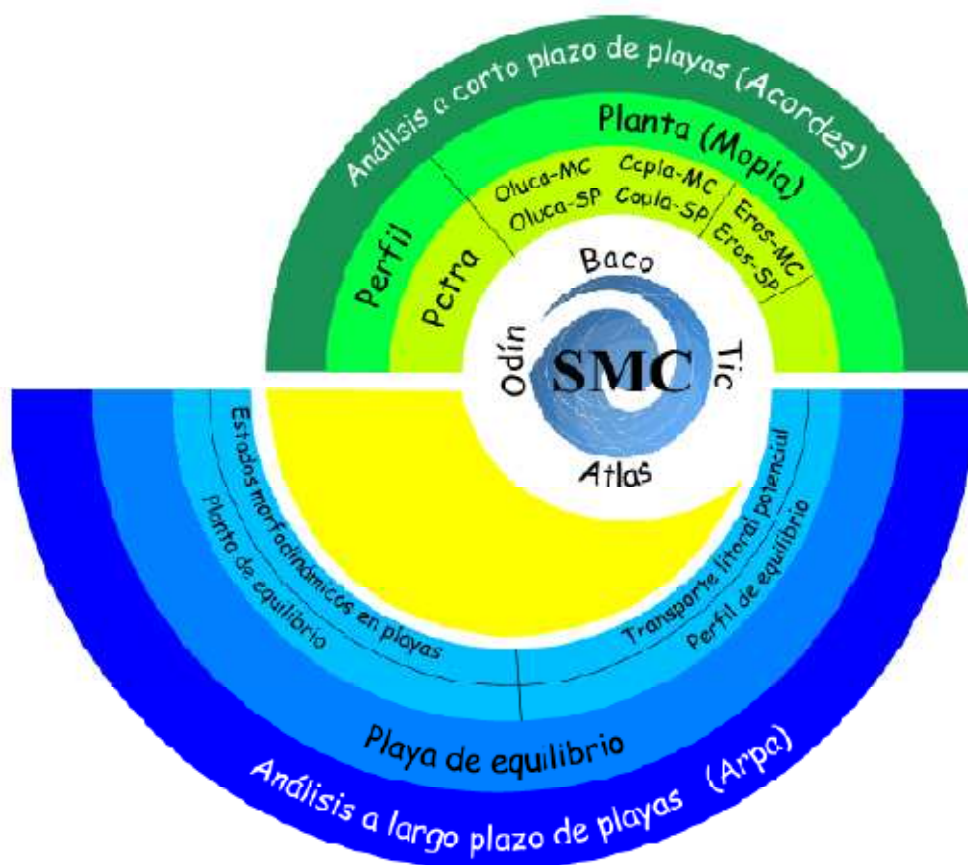


Figura 4.1 - Representação esquemática do SMC (manual SMC)

4.3. MÓDULO PRÉ-PROCESSO

O módulo Pré-Processo trata e processa a informação de entrada necessária aos programas do SMC, e está dividido em três secções, a que trata das batimetrias e contornos da costa (Baco), uma segunda que está relacionada com informações associadas à hidrodinâmica como a agitação marítima (Odín) e também uma secção referente às cotas de inundação (Atlas). Este módulo não será explorado no âmbito deste trabalho visto que os dados fornecidos por estes três programas dizem respeito apenas à costa espanhola, isto é, à costa continental atlântica e mediterrânica e também às ilhas.

4.4. MÓDULO DE ANÁLISE DE PRAIAS A CURTO PRAZO

Este módulo, que analisa sistemas costeiros numa escala espacial e temporal de curto prazo, é composto por modelos de evolução morfodinâmica de perfis a duas dimensões verticais e também modelos de evolução de perfis a duas dimensões horizontais. Os primeiros dizem respeito ao Petra (Programa de evolução do perfil transversal de praias) e os segundos ao Mopla (Programa de morfodinâmica de praias).

4.4.1. PETRA

O programa Petra permite a modelação da evolução no tempo de um perfil transversal de praia, simulando a propagação da agitação regular ou irregular, a rotura, a inundação da zona de praia seca, as correntes e o transporte de sedimentos em suspensão e pelo fundo. Permite com isto obter a evolução do perfil de praia, depois da acção da agitação, com um nível de maré variável no tempo.

4.4.2. MOPLA

O Mopla é um programa que permite simular numa zona litoral a propagação da agitação desde profundidades indefinidas até a linha de costa. Calcula também as correntes induzidas na zona de rebentação e simula a evolução morfodinâmica de uma praia.

O programa permite realizar vários estudos e simulações, em particular, no que diz respeito à propagação da agitação é possível simular a propagação desde grandes profundidades até à linha de costa incluindo os efeitos da refração, assoreamento, difracção e dissipação por rotura e pós-rotura. Quanto às correntes o módulo Mopla permite caracterizar a sua circulação em praias e determinar o campo de correntes para o cálculo do transporte de sedimentos. Finalmente, no âmbito da evolução morfológica de uma praia, o programa calcula o transporte inicial de sedimentos devido à agitação e às correntes, determina zonas de sedimentação e erosão de uma praia, e prevê a evolução bidimensional e horizontal de uma praia quando submetida a um qualquer evento de agitação.

O módulo Mopla é constituído por seis modelos numéricos, três correspondentes a agitação regular e os restantes a agitação irregular. Estes simulam a propagação da agitação, o sistema de correntes, o cálculo e o transporte de sedimentos e a evolução da batimetria. O primeiro grupo é composto pelo modelo Oluca-MC (modelo parabólico de propagação de agitação regular), o modelo Copla-MC (modelo de correntes em praias induzidas pela rotura de ondas), e o modelo Eros-MC (modelo de erosão-acreção) e de evolução da batimetria em praias), são aplicáveis, essencialmente quando se pretende um estudo da morfodinâmica média num tramo de linha de costa. Os restantes três aplicam-se às simulações com agitação irregular, Oluca-SP, Copla-SP, e Eros-SP.

4.4.2.1. Conceitos Básicos

Neste ponto são descritos alguns conceitos básicos do módulo Mopla, para melhor compreensão do programa:

- **Malha:** de forma rectangular e situada sobre uma batimetria constitui uma rede, em que os valores dos seus nodos são interpolados a partir dos dados da batimetria de base. Estes valores servem depois como dados de entrada para os modelos de propagação de ondas e de correntes.

- Malha encadeada: conjunto de malhas com diferentes características em que a última fila de uma é a primeira de outra. Desta forma poderá aplicar-se o modelo de propagação de ondas a uma malha, e usar os resultados como dados de entrada na malha seguinte.
- Caso: poderá ser somente um caso de agitação ou poderão ser também casos de correntes e casos de transporte. Consiste na aplicação a uma ou grupo de malhas, de um conjunto de parâmetros que definem a agitação, ou adicionalmente as correntes e também dados que permitam realizar o cálculo do transporte de sedimentos e evolução de uma praia.

4.4.2.2. Hipóteses e Restrições do Mopla

As principais hipóteses de base e restrições dos modelos já referidos são as seguintes:

- Modelo parabólico de propagação de agitação (Oluca-SP e Oluca-MC):
 - Fluido: Não viscoso; Incompressível; Densidade constante.
 - Fluxo: Irrotacional e estacionário.
 - Dinâmica: Pressão constante na superfície livre; Não é considerada a acção do vento; nem a acção da aceleração de Coriolis.
 - Contorno: Fundo de pendente suave - As equações do modelo partem do pressuposto de que a variação do fundo com a horizontal é pequena em comparação com o comprimento da onda. Berkhoff (1982) verificou que até pendentes de 1:3 o modelo é exacto, e que para pendentes maiores, prevê as tendências de forma adequada.
 - Propagação: Fraca dependência da equação da dispersão em relação à amplitude da onda regular ou à altura de onda significativa; modelo não linear de Stokes-Hedges; As ondas propagam-se na direcção principal xx , na qual se desprezam termos de 2ª ordem, sendo que a solução será tanto mais aproximada quanto menor a variação na direcção xx .

Limitações de Propagação:

- As pendentes do fundo devem ser menores que 18° (1:3) para garantir a condição de pendente suave (ver figura 4.2.)
- O ângulo de propagação do primeiro alinhamento da malha deve estar dentro do intervalo $\pm 55^\circ$, em relação ao eixo principal, eixo xx (ver figura 4.3.). Os erros começam a ser importantes se os ângulos saírem do intervalo referido. Deverá também orientar-se a malha na direcção principal da agitação (ver figura 4.4.)
- Como o modelo foi desenvolvido para ser aplicado em zonas costeiras e praias, onde os fenómenos dominantes são a refacção e a difracção, este não é aplicável para casos onde a reflexão é um fenómeno importante, isto é, no caso de portos (ver figura 4.3.).

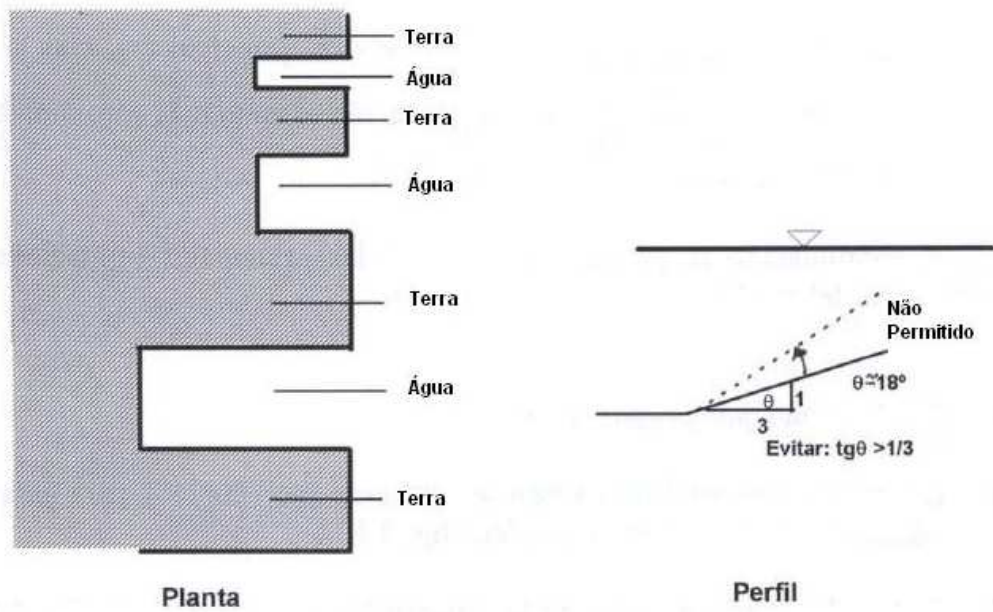


Figura 4.2 - Esquema de contornos que se devem evitar (adaptado de manual Mopla)

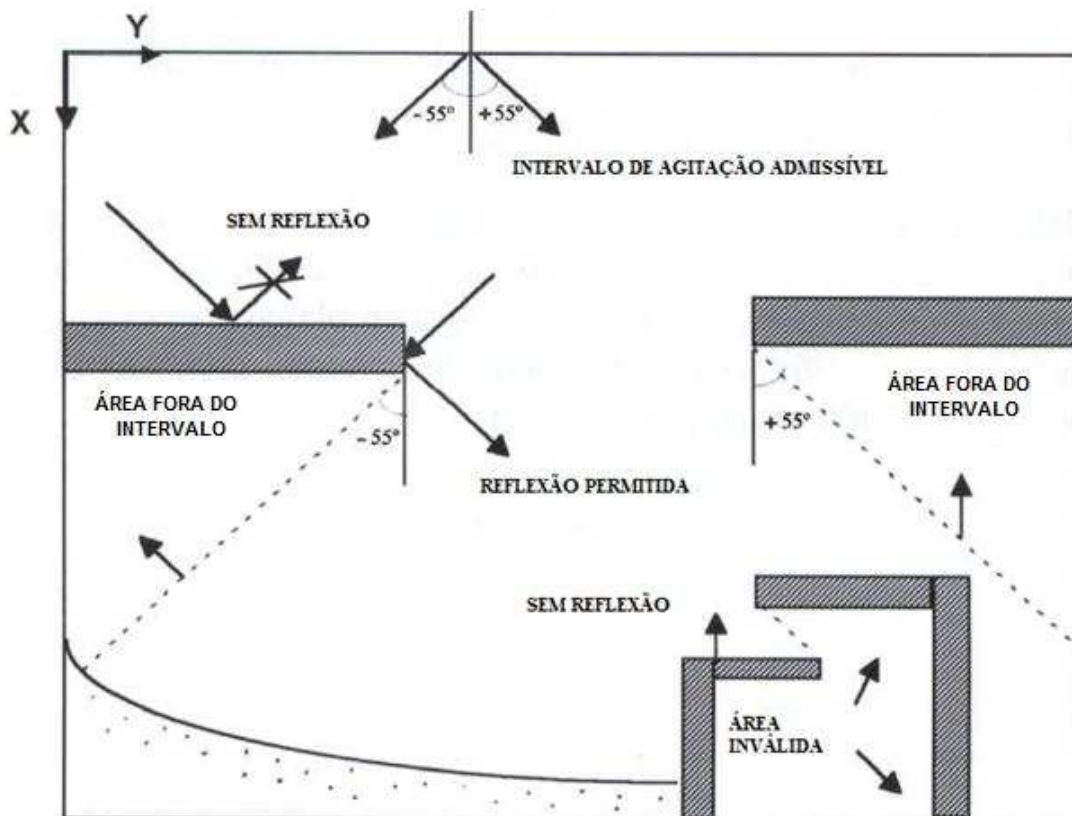


Figura 4.3 - Zonas válidas de propagação e limite ângulos limite (adaptado de manual Mopla)

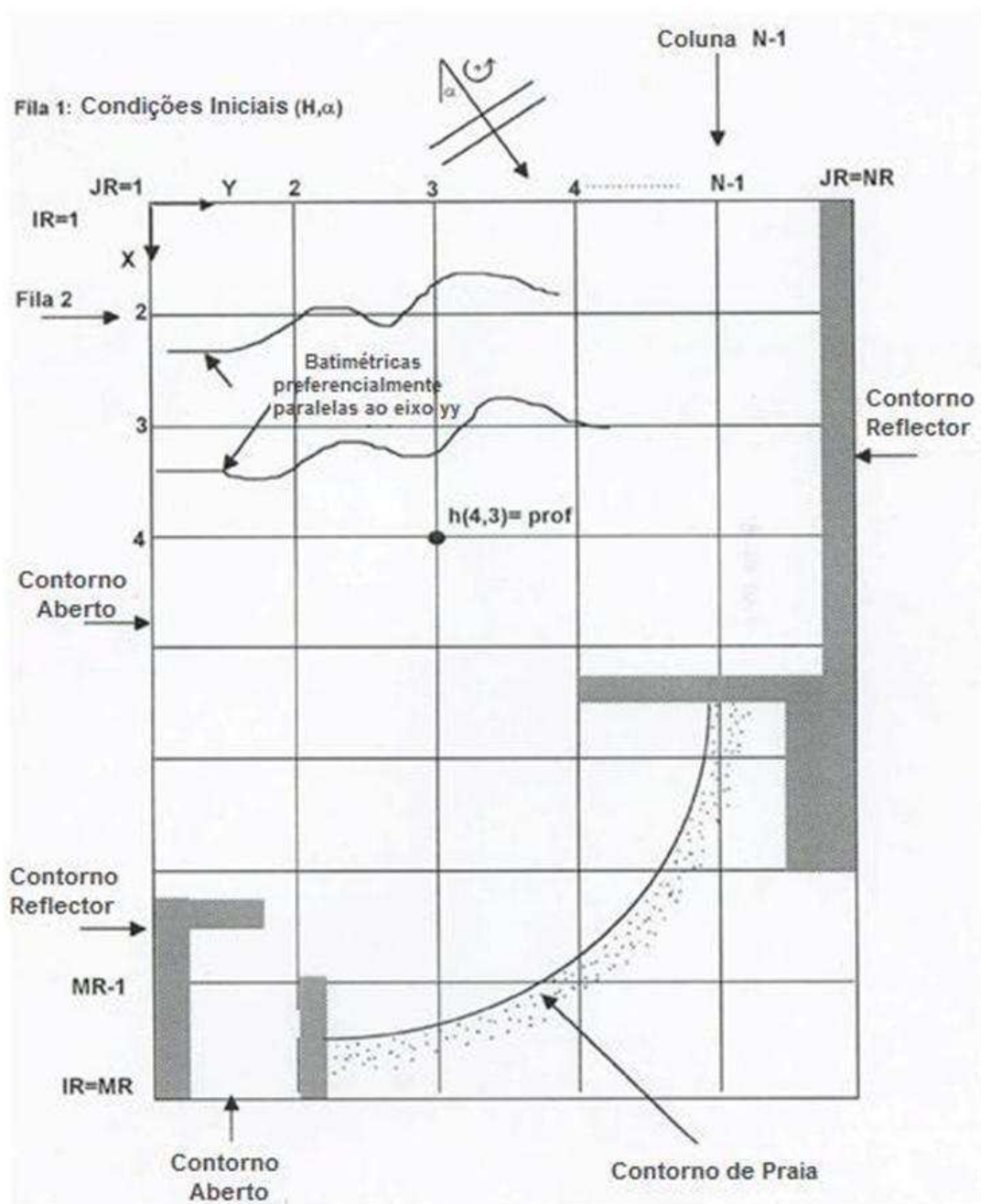


Figura 4.4 - Esquema geral de malhas e contornos (adaptado do manual SMC)

Limitações de contornos e condições iniciais:

- Evitar mudanças bruscas na profundidade da batimetria (pendentes superiores a 1:3);
- É no primeiro alinhamento que se definem as condições iniciais de agitação, onde é assumido que a agitação é igual para todos os pontos (amplitude, período e direcção), pelo que é preferível que neste alinhamento não existam variações muito fortes nas profundidades;
- O Mopla impõe condições de contornos laterais reflectores aplicando a lei de Snell, por isso, deve tentar evitar-se o efeito destes contornos laterais o mais longe possível da zona

de estudo e também tentar que a batimetria destes contornos seja o mais paralela possível ao eixo dos yy, Figura 4.4.;

- Evitar contornos laterais que alternam água-terra-água, pois podem gerar erros numéricos
- O modelo só propaga ondas em profundidades superiores a 0,30 metros;
- O programa limita as batimétricas em terra a -7.0 metros, isto tendo em conta que o programa assume valores positivos para as batimétricas na direcção das profundidades crescentes do mar;
- Existem limitações às dimensões dos elementos das malhas do domínio de cálculo. No quadro 4.1. estão descritos os valores máximos.

Quadro 4.1. - Limitação das Malhas

Tipo de modelo	Nodos da malha x,y	Subdivisões em x	Subdivisões em y	Número de frequências	Número de direcções
Irregular	500	60	3500	20	20
Regular	500	60	5000	1	1

- Modelo Bidimensional de correntes em Praias (Copla-MC e Copla-SP):

Fluido: Homogéneo; incompressível; densidade constante.

Fluxo: A velocidade de corrente é independente da profundidade; cada conjunto de ondas cria o seu próprio sistema circulatório de correntes; o movimento oscilatório é essencialmente irrotacional; as flutuações turbulentas devidas à agitação são desprezáveis; as correntes são suficientemente fracas para se considerar a sua interacção com o conjunto de ondas.

Dinâmica: Pressão constante na superfície livre; não é considerada a acção do vento; nem a influência da aceleração de Coriolis

Contorno: Visto que o modelo Copla é executado a partir dos resultados do modelo Oluca, isso implica que as considerações são semelhantes.

- Modelo de evolução morfológica de uma praia (Eros-MC e Eros-SP):

Este modelo avalia o transporte de sedimentos a partir de formulações de agitação-correntes. As simulações, visto que são efectuadas com modelos de curto prazo, terão tempos máximos que não devem superar as 72 horas

4.4.2.3. Parâmetros Característicos de cada Modelo

Cada modelo tem uma série de parâmetros editáveis que permitem escolher as características e hipóteses consideradas nas simulações.

Começando pelo modelo Oluca-MC, referente à agitação regular, no que diz respeito à agitação é possível editar a altura de onda, a direcção da agitação, o período e o nível correspondente à maré que se deseja simular. É também possível escolher se se pretende usar um modelo linear, composto ou de Stokes, se a dissipação é amortecida em fundo poroso, se se opta por uma camada limite turbulenta

e/ou camada limite laminar e ainda seleccionar a opção para contornos abertos, ou seja, não reflectores. Para o Oluca-SP, utilizado para agitação irregular, é possível escolher entre um espectro TMA, ou incluir informação de outro tipo de espectros pretendidos. Escolhida a opção do espectro TMA, que será apresentado de forma resumida em 4.4.2.4, poderão ser editados vários parâmetros como a profundidade, a altura de onda significativa, a frequência de pico, a frequência máxima, o parâmetro de forma e o número de componentes. Para o espectro direccionado, é possível definir a direcção média. Uma vez definidos os parâmetros referentes aos espectros, estes poderão ser visualizados em formatos 2D e 3D. Na subpágina referente ao modelo pode ser definido se se pretende um modelo linear, composto e/ou de Stokes, a amplitude de maré, a dissipação por rotura poderá ser de Thornton e Guza, Battjes e Janssen, Winyu e Tomoya. Ainda nesta subpágina é também definida a dissipação de fundo e os contornos laterais da mesma forma que para o Oluca-MP. Na subpágina componente é possível seleccionar uma das componentes de energia referentes aos espectros. Por fim, na subpágina das saídas, são calculados os espectros de saída e também é calculada a elevação da superfície livre.

No Copla, tanto para a versão de agitação regular como de agitação irregular, os parâmetros a editar são o número de iterações em tempo total e do intervalo pretendido, a rugosidade, e a viscosidade de turbulência.

Finalmente o Eros, para ambas versões, inclui parâmetros relacionados com os sedimentos, nomeadamente o D_{50} e D_{90} , ângulo de atrito de repouso, o peso volúmico, a porosidade e o desvio padrão da amostra considerada. Quanto ao fluido, neste caso água do mar, é apenas editável o peso volúmico e a viscosidade. Nas características da simulação é possível escolher entre uma evolução morfodinâmica ou entre um estudo de acreção-erosão inicial, assim como a duração do evento em estudo e a máxima variação dos fundos. Por fim, podem também editar-se as características do modelo, escolhendo Bailard (1981) ou Soulsby (1997), ambos referidos por Manual Eros 3.0, assim como o tempo total e o intervalo a considerar. Estas formulações calculam o transporte total, considerando o transporte em suspensão e o transporte pelo fundo.

A expressão de Bailard (1981) pode definir-se como a soma de quatro parcelas:

$$\vec{q}_t = \vec{q}_{b0} - \vec{q}_{bs} + \vec{q}_{s0} - \vec{q}_{ss} \quad (4.1)$$

em que:

$$\vec{q}_{b0} = \frac{C_f \varepsilon_B}{g(s-1) \tan \phi} < |\vec{u}|^2 \vec{u} > \quad (4.2)$$

$$\vec{q}_{bs} = \frac{C_f \varepsilon_B \tan \beta}{g(s-1) \tan^2 \phi} < |\vec{u}|^3 > \vec{i} \quad (4.3)$$

$$\vec{q}_{s0} = \frac{C_f \varepsilon_s}{g(s-1) w_s} < |\vec{u}|^3 \vec{u} > \quad (4.4)$$

$$\vec{q}_{ss} = \frac{C_f \varepsilon_s^2 \tan \beta}{g(s-1)w_s^2} < |\vec{u}|^5 > \vec{i} \quad (4.5)$$

sendo g a aceleração da gravidade em m/s^2 , s a densidade relativa dos sedimentos, C_f o coeficiente de fricção tal que $\vec{\tau} = \rho C_f |\vec{u}| \vec{u}$, em que $\vec{\tau}$ representa a tensão tangencial no fundo em N/m^2 , $\vec{u}$ é a velocidade no fundo devida à acção conjunta da agitação marítima e das correntes, ϕ é o ângulo de atrito interno dos sedimentos, $\tan \beta$ é a pendente do fundo, $\vec{i}$ é o vector unitário na direcção da pendente, w_s é velocidade de queda dos sedimentos em m/s , ε_s é o factor de eficiência do transporte em suspensão igual a 0,02 e ε_B é o factor de eficiência do transporte pelo fundo igual a 0,1. Cada uma das parcelas tem o seu significado próprio sendo então que (4.1) representa o transporte total pelo fundo e por suspensão nas direcções x e y , (4.2) representa o transporte pelo fundo sobre um leito plano, (4.3) o transporte pelo fundo devido ao efeito da pendente do fundo e (4.4) e (4.5) representam respectivamente o transporte em suspensão sobre leito plano e o transporte em suspensão devido ao efeito da pendente do fundo.

O vector velocidade no fundo pode ser expresso por:

$$\vec{u} = \vec{u}_{orb} + \vec{\bar{u}} \quad (4.6)$$

em que $\vec{u}_{orb}$ corresponde ao vector velocidade no fundo devido à agitação e $\vec{\bar{u}}$ é o vector velocidade média integrada na vertical. Admitindo agora a decomposição da velocidade nas duas direcções segundo os eixos xx e yy :

$$\vec{u} = (u_{orb,x} + \bar{u})\vec{i} + (u_{orb,y} + \bar{v})\vec{j} \quad (4.7)$$

em que a velocidade orbital, de acordo com a teoria linear, se define como:

$$u_{orb} = \frac{\pi H}{T \sinh kh} \quad (4.8)$$

E em que $u_{orb,x} = u_{orb} \cos \theta$, $u_{orb,y} = u_{orb} \sin \theta$, k representa o número de onda, h a profundidade, T o período, H a altura de onda, e θ o ângulo de incidência da agitação.

Para a agitação irregular, Soulsby (1997) propõe a utilização dos parâmetros espectrais do período de pico T_p , e da altura de onda quadrática média H_{rms} para substituir T e H . Para além disso, este modelo assume que o ângulo de incidência da agitação corresponde à direcção do fluxo médio de energia.

A formulação de Soulsby é uma expressão analítica experimental que se aproxima muito da formulação de onda-corrente de van Rijn (1993), referido por Manual Eros 3.0. A expressão avalia tanto o transporte pelo fundo como por suspensão sobre fundo horizontal.

$$q_t = A_s \bar{U} \left[\left(\bar{U}^2 + \frac{0,018}{C_D} U_{rms}^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \bar{U}_{cr} \right]^{2,4} \quad (4.9)$$

em que,

$$q_t = (q_x, q_y) \quad (4.10)$$

$$A_s = A_{sb} + A_{ss} = \frac{0,005h \left(D_{50}/h \right)^{1,2}}{[(s-1)gD_{50}]^{1,2}} + \frac{0,012D_{50}D_*^{-0,6}}{[(s-1)gD_{50}]^{1,2}} \quad (4.11)$$

$$D_* = \left[\frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{1/3} D_{50} \quad (4.12)$$

$$C_D = \left[\frac{0,40}{\ln(h/z_0 - 1)} \right]^2 \quad (4.13)$$

$\bar{U}$ corresponde à velocidade média em profundidade, U_{rms} é a velocidade orbital quadrática-média e $\bar{U}_{cr}$ é a velocidade crítica de início de movimento (assumindo a rugosidade efectiva $K_s = 3D_{90}$, $D_{90} = 2D_{50}$);

$$\bar{U}_{cr} = 0,19(D_{50})^{0,1} \log_{10} \left(\frac{4h}{D_{90}} \right) \quad 0,1 \leq D_{50} \leq 0,5mm \quad (4.14)$$

$$\bar{U}_{cr} = 8,5(D_{50})^{0,6} \log_{10} \left(\frac{4h}{D_{90}} \right) \quad 0,5 \leq D_{50} \leq 2mm \quad (4.15)$$

em que h representa a profundidade, D_{50} é o diâmetro médio dos sedimentos, D_{90} é o diâmetro que é superado em 10% do peso, z_0 rugosidade do fundo (0,006 m), s é a densidade relativa, g é a aceleração da gravidade, e v é a viscosidade cinemática da água ($v = 2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

4.4.2.4. Breve descrição do espectro TMA

O espectro TMA é aplicável desde águas profundas a pequenas profundidades, até à zona de rebentação. A sua forma final é expressa por:

$$S_{TMA}(f, d) = S_p(f) \phi_{PM}(f, f_m) \phi_J(f, f_m, \gamma, \sigma_a, \sigma_b) \phi_K(2\pi f, d) \quad (4.16)$$

$$S_{TMA}(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp[-5/4 (f/f_m)^{-4}] \times \exp\{\ln(\gamma) \exp[-(f - f_m)^2 / 2\sigma^2 f_m^2]\} \times \phi_K(2\pi f, d) \quad (4.17)$$

Esta expressão contém a função do espectro de Pierson e Moskowitz (ϕ_{PM}), e também a função do espectro de JONSWAP (ϕ_J). Poderá também ser expressa sob a forma 4.17. As constantes α e γ são definidas consoante a profundidade segundo as relações 4.18 e 4.19, onde k corresponde à expressão 4.20, em que $k_m = (2\pi/L_m)$ corresponde ao número de onda para a frequência de pico f_m e L_m é o comprimento de onda para a profundidade d . Apesar de Hughes (1984), referido por Silvester *et al.* (1997), ter defendido que o espectro TMA era aplicável para ondas geradas pelo vento em qualquer profundidade, Goda (1990), também referido por Silvester *et al.* (1997), concluiu que o uso do TMA em pequenas profundidades deveria ser efectuado com reservas porque o modelo é essencialmente para ondas geradas pelo vento ainda na fase de crescimento. Na figura 4.5. é representada uma comparação entre o espectro TMA para vento uniforme de 20 m/s para um fetch de 500 quilómetros, para as várias profundidades, e também para o espectro JONSWAP para a profundidade de 50 metros.

$$\alpha = 0,0078k^{0,49} \quad (4.18)$$

$$\gamma = 2,47k^{0,39} \quad (4.19)$$

$$k = (U_{10}^2/g) k_m = (U_{10}^2/g) (2\pi/L_m) \quad (4.20)$$

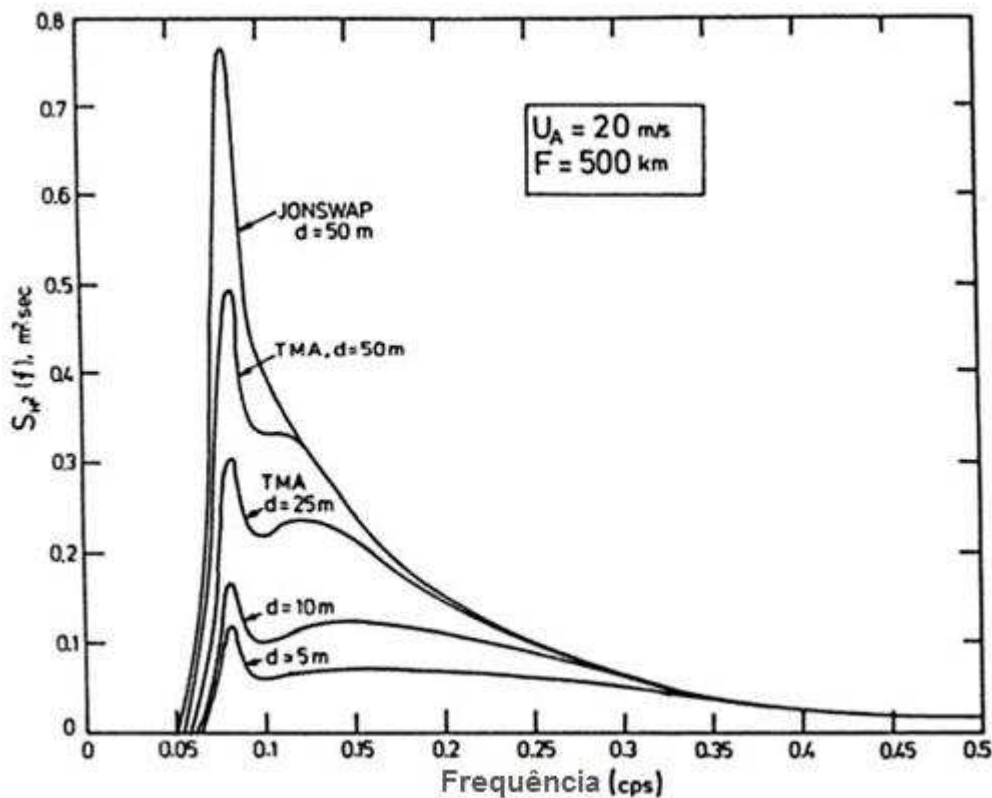


Figura 4.5 - Comparação do espectro TMA para várias profundidades com o espectro JONSWAP (adaptado de Silvester *et al.*, 1997)

4.5. MÓDULO DE ANÁLISE DE PRAIAS A LONGO PRAZO

O Arpa é constituído por um programa de praia em equilíbrio que permite simular qual a forma da praia a longo prazo. Este programa segue a metodologia proposta por González e Medina (2001) Os modelos numéricos de curto prazo são inadequados para esta análise, daí a utilização de formulações de forma em planta e perfil de equilíbrio. Partindo de uma batimetria inicial, o programa integra as formulações de equilíbrio modelando a batimetria final de uma praia em equilíbrio. Este programa integra também o MMT que será analisado em 4.6.

4.5.1. Conceitos Básicos

Neste ponto são apresentados alguns conceitos básicos referentes ao módulo MMT e Arpa para melhor compreensão do programa:

- Polígono: elemento que delimita um conjunto de pontos batimétricos que interessa sobrepor a uma batimetria base do plano de trabalho com o objectivo de alterar as suas coordenadas (x,y,z) ;
- Cenário: conjunto de dados locais (correntes, ondas, marés), que actuam sobre uma batimetria e com um conjunto de contornos rígidos como quebramares e esporões.
- Alternativa: associado a um cenário, possibilita a criação de diferentes alternativas ao plano de trabalho base, onde poderão ser testadas diferentes situações, mudando batimetrias e aplicando ferramentas de curto ou longo prazo, sem que se alterem as outras alternativas. Cada alternativa tem associados vários ficheiros próprios com toda a sua informação relevante.

4.5.2. CONCEITO GEOMÉTRICO DE PRAIA EM EQUILÍBRIO

A forma em planta é composta por uma série de curvas paralelas entre si, cuja forma obedece à configuração em planta de equilíbrio de uma praia gerada a partir do mesmo ponto de controlo. A linha em planta de cor azul corresponde à linha de costa e tem a si associada uma elevação batimétrica. Por outro lado, ligado a esta linha de costa, começa um perfil transversal da praia, que é perpendicular em cada ponto a esta linha, Figura 4.6..

O perfil de praia é composto por quatro secções (Figura 4.7.):

1. A zona da berma ou praia seca (pontos a preto);
2. O perfil de equilíbrio (pontos a verde);
3. O talude de intercepção no pé de perfil, de pendente constante e paralela ao perfil (pontos a azul);
4. Terreno original (cor vermelha).

O MMT gera uma praia em equilíbrio com um volume que se sobrepõe à batimetria base, o contorno da intersecção destes volumes é projectada em planta pela linha castanha na figura 4.6..

4.5.3. EDITOR DE PRAIA EM EQUILÍBRIO

As opções possíveis no que diz respeito ao editor de praia em equilíbrio poderão ser divididas em três áreas distintas, a página da planta de equilíbrio, a página do perfil de equilíbrio, e ainda o editor de praia.

Na primeira, a página de planta da equilíbrio, é definida a forma em planta seguindo a metodologia proposta por González e Medina (2001). Os parâmetros editáveis são:

- Ponto de início: para este três opções possíveis, o início da linha de costa é aquele até onde chega o efeito da difracção gerada por um ponto de controlo, o início livre, e ainda a possibilidade de escolher um ponto intermédio que pertença à forma em planta de equilíbrio, utilizando o modelo um método iterativo para definir o ponto de início;
- Forma em planta: pode ser de quatro tipos, o modelo parabólico de Hsu e Evans (1989), a versão modificada de Tan e Chiew (1994) ao modelo de Hsu e Evans, a espiral logarítmica e a rectilínea. Estas formulações são aplicadas a partir do ponto de início definido no ponto anterior;
- Ponto de controlo: escolha das coordenadas (x,y) sobre o plano para o ponto de controlo;
- Frente de agitação: é definida a partir da orientação e do comprimento de onda na zona próxima do ponto de controlo, tendo por base o ângulo θ (graus), a profundidade da água h_d (metros) e o período (segundos). No caso de início livre apenas é possível definir a orientação;
- Distância da linha de costa: No caso de início com estrutura, é definida uma distância Y (metros) ou o R_0 . O α_{min} , o β e o Y/L_d são apenas visíveis e não editáveis. Para o caso do início livre é possível definir a distância da linha de costa através da edição de R_0 e de β . Para o início com ponto intermédio não é possível editar qualquer informação neste campo;
- Batimétrica da linha de costa: aqui é definida a elevação da linha de costa em equilíbrio.

Na Página de perfil de equilíbrio são definidos os seguintes parâmetros, que permitem definir o perfil transversal de praia:

- Perfil de pé de talude: definida a pendente de intersecção do perfil com o terreno base, quer na direcção paralela ao perfil, quer na direcção perpendicular a este;
- Praia seca: aqui é definida a altura de berma (metros) e a largura (metros);
- Tipo de perfil: neste ponto é definido o tipo de perfil, ou seja, se é de um tramo ou de dois tramos;
- Cortes transversais: esta opção permite sobrepor ou retirar perfis transversais, como o perfil de equilíbrio ou o perfil original do terreno, e calcular o volume necessário para gerar a praia em equilíbrio desejada.

Finalmente, o editor de praia permite definir características visuais da praia em equilíbrio, como a densidade de pontos dentro deste polígono, e gerar a de praia em equilíbrio. As opções são as seguintes:

- Propriedades gráficas: definição de cores e de elementos visíveis no plano, como as linhas batimétricas e pontos de controlo;
- Editor de praia: aqui é definida a densidade dos pontos em planta e em perfil a que se associa a batimetria correspondente à praia de equilíbrio;
- Gerar polígono: neste ponto o programa gera o polígono provisório correspondente à praia de equilíbrio. Este poderá ser ajustado e corrigido.

4.6. MÓDULO MODELADOR DO TERRENO (MMT)

O MMT tem como funcionalidade permitir a modificação da batimetria ao incluir ou excluir contornos rígidos como esporões, quebramares, muros, e também outros contornos como aterros de areia. Com isto é possível obter diversos cenários para análise com os outros programas do SMC, como o Arpa ou o Mopla.

O MMT possui editores do plano de trabalho que vão desde o editor de pontos, polígonos, editor de praias em equilíbrio, costas e também editor de imagens. Com estes é possível inserir, apagar, alterar pontos à batimetria existente, definir contornos como esporões, aterros e quebramares, obter batimetrias de praias encaixadas, protegidas por esporões e/ou quebramares na forma em planta e perfil de equilíbrio, localizar contornos costeiros (terra-mar), e incluir imagens referenciadas de cartas náuticas, mapas e fotografias que possam servir de base de referência a simulações no SMC.

Este módulo contempla também o programa de regeneração de terreno. Com ele é feita a combinação de elementos criados para as simulações, como polígonos correspondentes a quebramares, com a batimetria base da zona de estudo, gerando um novo conjunto de batimétricas, e um novo ficheiro (.xyz) com o nome da alternativa definida anteriormente. Este ficheiro poderá ser também usado para o estudo com o Mopla na análise de curto prazo.

Outras aplicações deste módulo MMT passam pela possibilidade de criar um ficheiro de batimetrias através de uma imagem, onde poderão ser gerados polígonos que formaram o ficheiro com os dados das batimetrias. Poderão ser geradas situações passadas, presentes e também futuras de uma mesma zona de estudo e utilizá-las para serem analisadas como diferentes cenários do mesmo caso pelos modelos numéricos do SMC.

4.7. MÓDULO TUTOR DE ENGENHARIA COSTEIRA (TIC)

Este programa tem como objectivo reunir um conjunto de fórmulas e procedimentos de cálculo simples relativos à engenharia costeira com maior utilidade no que diz respeito à actividade profissional. É composto por unidades básicas independentes, os módulos, agrupados em quatro grupos fundamentais, dinâmica, processos de sedimentação, as obras marítimas, e o impacto ambiental. Estas quatro grandes secções possuem então um total de 33 módulos. É agora apresentado um esquema do Tic. Cada um destes 13 pontos seguintes, tem um ou mais módulos de cálculo associados.

Dinâmica:

- Ondas;
- Agitação;
- Propagação e Rotura;
- Nível do Mar.

Processos Litorais:

- Análise Granulométrica;
- Transporte de Sedimentos;
- Forma em Planta;
- Transporte Longitudinal;
- Estados Morfodinâmicos;
- Processos Litorais em Estuários.

Obras Marítimas:

- Fluxo em Quebramares de Enrocamento;
- Estabilidade de Quebramares de Enrocamento;
- Cálculo de Quebramares Verticais e Mistos.

Impacto Ambiental

5

CASO DE ESTUDO - QUEBRAMAR DESTACADO PARA A FRENTE MARÍTIMA DE ESPINHO

5.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL

A cidade de Espinho, incluída num concelho com 21 km² e cerca de 30 mil habitantes pertencente ao distrito do Aveiro, faz fronteira a Norte com o concelho de Vila Nova de Gaia, a Oeste com o Oceano Atlântico (frente marítima em estudo), a Sul com Ovar e a Este com Santa Maria da Feira, é um importante local turístico do norte de Portugal, especialmente na época balnear. A cidade desenvolve-se sobre a praia, estando dotada de um importante pólo de diversão nocturna com o casino e o bingo (figura 5.1a) e 5.2b)). A praia atrai praticantes de desportos aquáticos como o *surf* e o *bodyboard*, sendo também palco de campeonatos de voleibol a nível internacional. Possui também uma importante estação de caminhos-de-ferro, que a liga às grandes cidades mais próximas como Vila Nova de Gaia, Aveiro e Porto. A cidade está implantada sobre formações arenosas geologicamente muito recentes, contemporâneas das que confinaram a laguna de Aveiro.



a)



b)

Figura 5.1 - a) Vista sobre a marginal a partir do esporão norte, b) vista aérea sobre a cidade e baía de Espinho (Google Earth™)

Ao longo da história da cidade a zona marginal tem sido recorrentemente atacada pelo mar, atendendo também a que Espinho se encontra na faixa de costa mais energética e mais dinâmica de Portugal. A figura 5.2. faz a representação esquemática do recuo da costa no final do século XIX e início do século XX da cidade de Espinho, na altura ainda vila. É de assinalar que neste período, existiu um recuo de 225 metros em 25 anos.

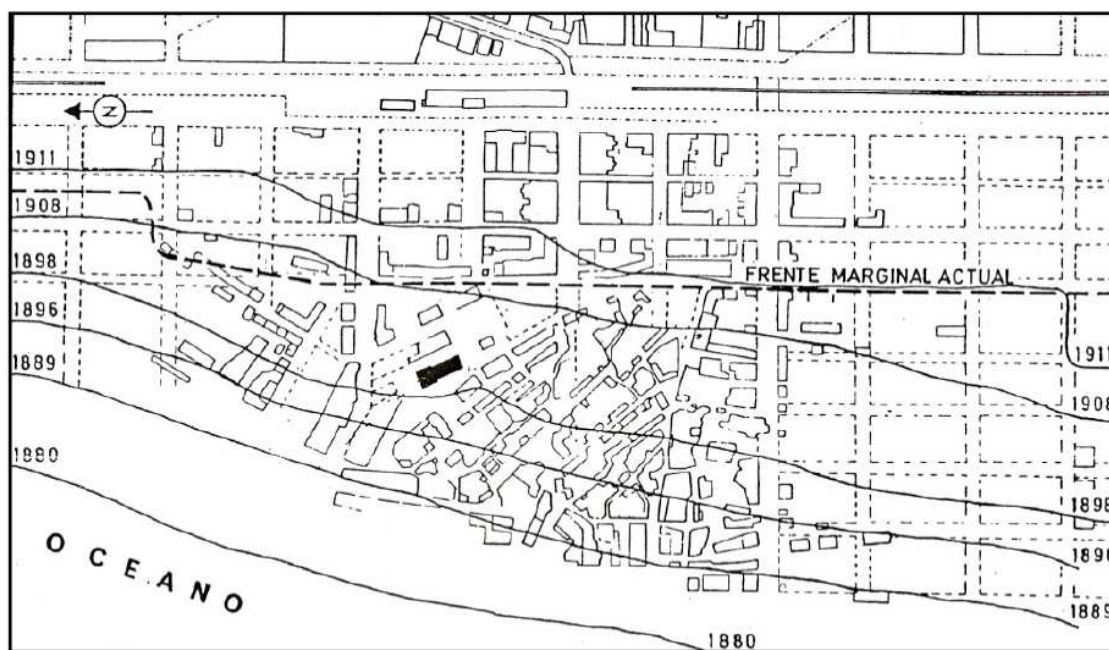


Figura 5.2 - Recuo da costa de Espinho entre 1880-1911 (Mota Oliveira, 1991)

Nas décadas seguintes foram construídos três esporões que promoveram um crescimento da praia mas nas décadas de 30 e 40 o mar voltou a entrar na cidade. Seguem-se a ampliação dos esporões e a construção de uma estrutura aderente, que tentaram conter a contínua investida do mar sobre a cidade. No início da década de 80 foram construídos quatro grandes esporões, sendo que os construídos no início do século XX foram demolidos. Desde então a situação tem-se mantido constante e estável. Na figura 5.3. é perceptível a constante evolução da costa entre as décadas de 50 e 80. Dos quatro esporões construídos na década de 80, existem apenas os maiores, o esporão Espinho (esporão norte) com cerca de 350 metros de comprimento e o esporão da marinha (esporão sul) com 400 metros. Estas duas estruturas de defesa foram reforçadas em 1997, no âmbito do Plano Geral de Obras de Protecção tendo em vista o aumento da largura de coroamento para 8 metros. A contínua redução das fontes aluvionares e as condições de agitação fortes em que está inserida a cidade de Espinho, não permitiram que os resultados expectáveis fossem totalmente alcançados, sendo que desde logo se notou uma erosão localizada na zona central da área de intervenção, localizada entre os esporões principais Norte e Sul.

Para uma análise das alterações mais recentes, é apresentado um conjunto de imagens (figura 5.4.) de Setembro de 2003, Outubro de 2006, e ainda Junho de 2007, que deixam bem patente a constante alteração da área de praia em Espinho.



Figura 5.3 - Evolução da costa de Espinho entre 1958 e 1988 (adaptado de Mota Oliveira, 1991)

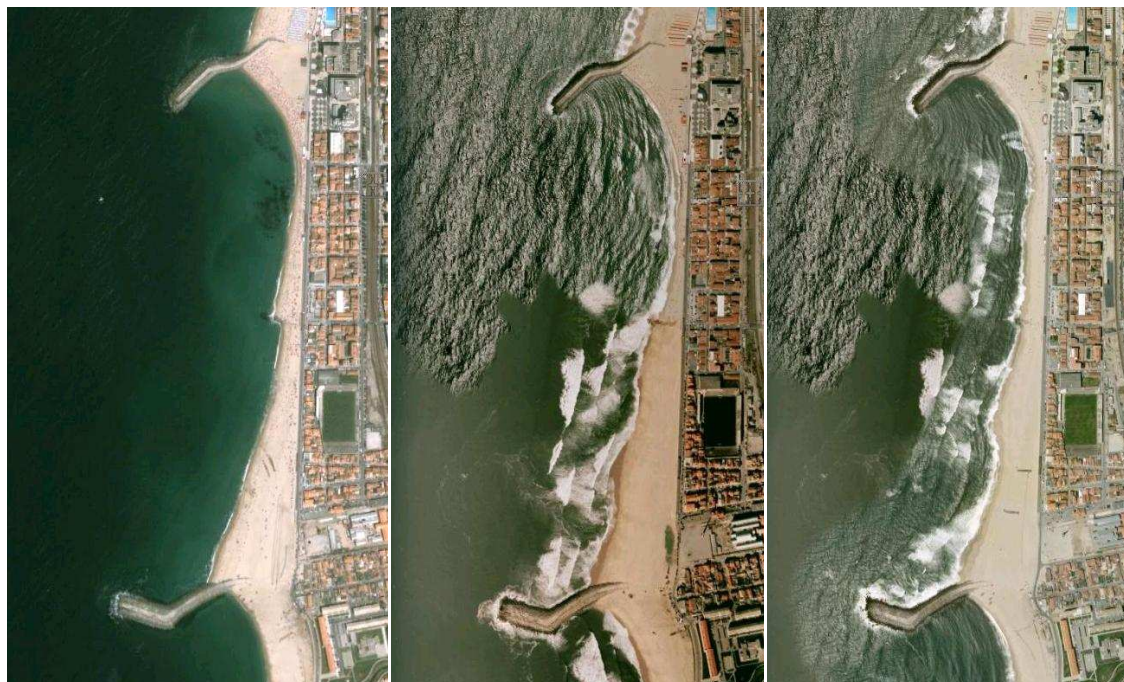


Figura 5.4 - Frente Marítima de Espinho em Setembro 2003, Outubro 2006 e Junho 2007 (da esquerda para a direita) (Google Earth™)

5.2. CARACTERÍSTICAS DA OBRA EM ESTUDO

5.2.1. QUEBRAMAR DESTACADO

No trabalho «Projecto de um quebramar destacado de protecção para a frente marítima de Espinho» (Pereira, 2008) foi proposto um quebramar destacado tendo em vista a mitigação do problema atrás descrito. Esta estrutura rectilínea poderia tomar várias direcções entre paralela a Norte ou a Sudeste, visto que as direcções predominantes da agitação são Oeste e Oés-Noroeste. O seu afastamento em relação à costa não poderia ser muito pequeno pois poria em risco a circulação das águas balneares, mas também se fosse muito grande a estrutura poderia não ter qualquer efeito na linha de costa.

O quebramar destacado projectado no trabalho referido apresenta um comprimento de 360 metros, e uma largura de coroamento de 17,7 metros. Os taludes do manto anterior e da cabeça do quebramar têm inclinações de 2:1 e de 3:2 no talude posterior. Isto resulta numa largura da fundação de 28 metros e um desenvolvimento total longitudinal de 421 metros.

A cota da superestrutura é de +5,0 metros ao zero hidrográfico (ZH), e a sua fundação está sensivelmente à cota -5,0 (ZH) metros. A figura seguinte (figura 5.5.) apresenta uma representação esquemática dessa proposta.

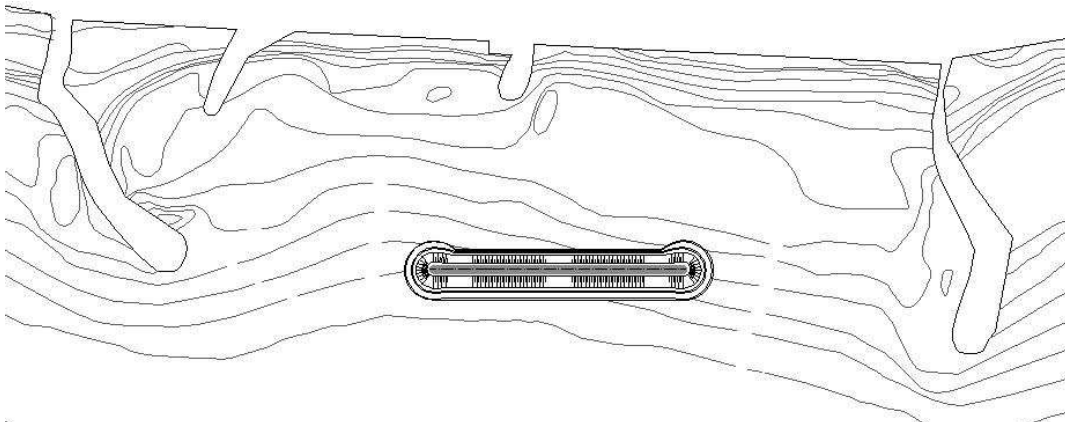


Figura 5.5 - Representação esquemática do quebramar destacado projectado (Pereira, 2008)

5.2.2. AGITAÇÃO MARÍTIMA

No que diz respeito às acções sobre o quebramar destacado, e de interesse para a modelação desta estrutura com o *software* SMC, os dados foram recolhidos da estação direccionada de Leixões, em Matosinhos, da publicação EUrosion, 2006, e de uma comunicação do Instituto Hidrográfico (Costa *et al.*, 2001), ambas referidas por Pereira (2008), tendo sido analisados e tratados no âmbito do trabalho «Projecto de um Quebramar Destacado de Protecção para a Frente Marítima de Espinho» (Pereira, 2008). Neste ponto irão então ser apresentados de forma resumida, alguns parâmetros usados no dimensionamento da estrutura, que tenham interesse para o presente trabalho.

Começando pelas características de maré, que na costa em estudo são semi-diurnas com ciclos de 12h25, foi considerado para efeitos de dimensionamento um nível de preia-mar de águas vivas de ocorrência excepcional de 4,0 metros. Neste aspecto foi assumido que Espinho tem características semelhantes às de Leixões, e não foram considerados os efeitos de marés meteorológicas. Contudo, procurar-se-á efectuar simulações com diferentes níveis de maré.

As direcções predominantes da agitação média, como já foi referido, estão situadas no quadrante entre o Norte e o Oeste. Este dado poderá ser confirmado se comparado com os dados das direcções de onda na bóia em Leixões (figura 5.6.)

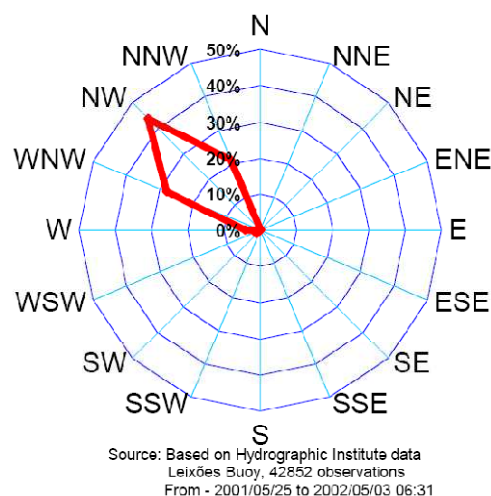


Figura 5.6 - Frequência da direcção das ondas registadas na bóia de Leixões (EUrosion, 2006)

Para a definição das alturas de onda a testar irão ser considerados tanto os valores significativos médios como os valores máximos. No caso da Figueira da Foz, os valores mais frequentes situam-se entre 1 a 2 metros, sendo a média de 2,2 metros. Em Leixões, a altura de onda significativa média é de 4,40 metros. Quanto à altura de onda significativa máxima registada, Leixões apresenta 8,52 metros, enquanto que para a Figueira da Foz apenas se sabe que excepcionalmente se verificaram alturas de onda significativa com altura superior a 7,0 metros. Na figura 5.7. está representada a variação sazonal da altura de onda significativa na Figueira da Foz.

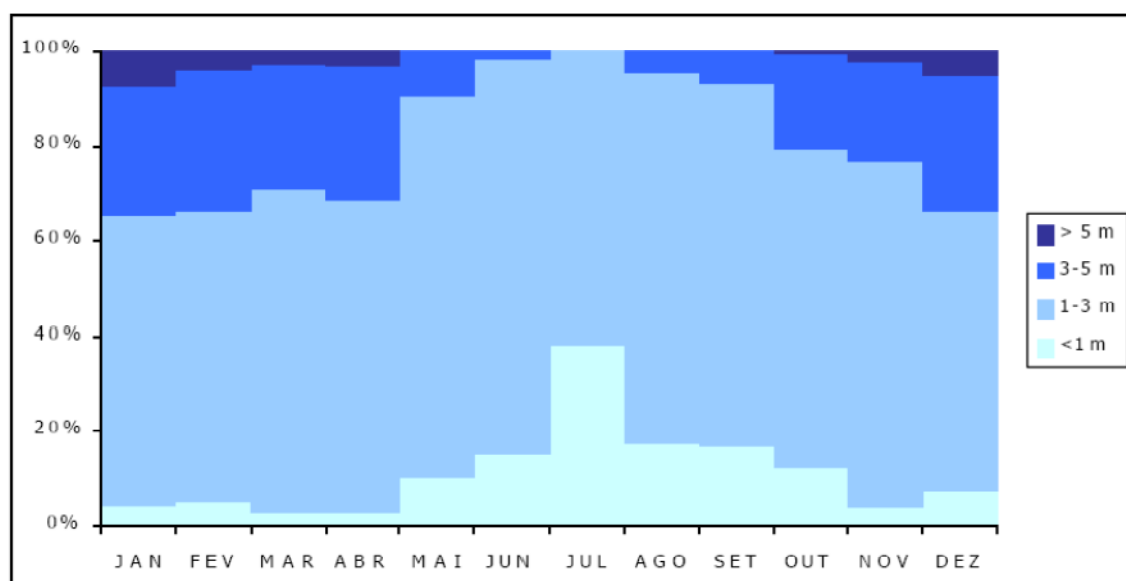


Figura 5.7 - Variação sazonal da altura de onda significativa na Figueira da Foz (Pereira, 2008)

Os períodos de onda mais frequentes para Leixões, correspondem a alturas entre 1,0 e 2,0 metros e variam entre 10 e 13 segundos. Na Figueira da Foz, para o intervalo de 1,0 a 3,0 metros, os períodos são de 11 a 15 segundos. O período de pico apresenta valores idênticos em ambas as estações com valores de 11,4 segundos a sul e 11,2 a norte. Durante a ocorrência de tempestades, na Figueira da Foz foram registados valores de 13 segundos, enquanto que em Leixões se verificaram períodos de 16 e 18 segundos para alturas de 8 metros.

No quadro 5.1. estão representados de forma mais sintética os valores enunciados anteriormente.

Quadro 5.1 - Valores extremos e médios globais da agitação na Figueira da Foz e em Leixões (adaptado de Pereira, 2008)

Local	Altura Significativa média [m]	Período Médio [seg]	Altura Sig Máxima [m]	Período de Pico [seg]	Direcção
Leixões	4,40	10-13	8-9	11,2	W- NW
Figueira da Foz	2,20	11-15	5-7	11,4	WNW-NW

Conhecida a cota de implantação de -5,0 metros (ZH), e sabendo que por influência da profundidade, a altura de onda está limitada fisicamente pela profundidade ($H=0,78d$), foi calculada para Espinho o

valor da altura de onda máxima possível de aproximadamente 7,0 metros. Foram também calculadas a altura de onda significativa e a altura de onda média do décimo superior, respectivamente, quer para Espinho quer para Leixões. No quadro 5.2. são apresentados os valores referidos.

Quadro 5.2 - Altura de onda máxima compatível com a profundidade, altura de onda significativa e altura de onda média do décimo superior (adaptado de Pereira, 2008)

Local	Altura Máxima [m]	Altura Significativa [m]	Altura média do décimo superior [m]
Leixões	8,52	4,40	5,59
Espinho	7,02	3,99	5,07

5.2.3. SEDIMENTOS

As características sedimentares consideradas neste estudo são relativas às praias da Costa Nova, Vagueira, Areão, Poço da Cruz e Mira, praias que pertencem ao distrito de Aveiro, ou seja, a menos de 50 quilómetros do local de estudo, tendo sido assumida a semelhança entre os sedimentos. Os dados foram retirados de Silva *et al.*, 2009.

Para a modelação no *software* SMC são necessários os seguintes dados: d_{50} , d_{90} , ângulo de atrito interno, peso volúmico do material sedimentar, porosidade e o desvio padrão da amostra. Para os valores de d_{50} foi considerado o intervalo de 0,39 a 0,57 milímetros (nas simulações 0,45) e para d_{90} o intervalo de 0,50 a 0,85 milímetros (nas simulações 0,75), tendo como desvio padrão médio das amostras o valor de 1,2 (Silva *et al.*, 2009).

O valor da porosidade, parâmetro de difícil quantificação, foi considerado igual a 0,4 (Soulsby, 1997). Como peso volúmico foi admitido que o material terá $26,5 \text{ kN/m}^3$, e que como ângulo de atrito de repouso 32° . Estes valores são os mais comuns para sedimentos marinhos de praias do tipo do caso de estudo.

5.2.4. BATIMETRIA

Os dados existentes em suporte digital têm como versão mais recente um levantamento de 1988, estando georreferenciados em Datum 73. Já no trabalho desenvolvido por Perreira (2008), a base de trabalho foi este levantamento com cerca de 20 anos, que apesar de desactualizado, poderá ser considerado como representativo da área em estudo, visto que não existiram grandes mudanças ao nível de novas estruturas de defesa. A figura 5.8. representa este levantamento.

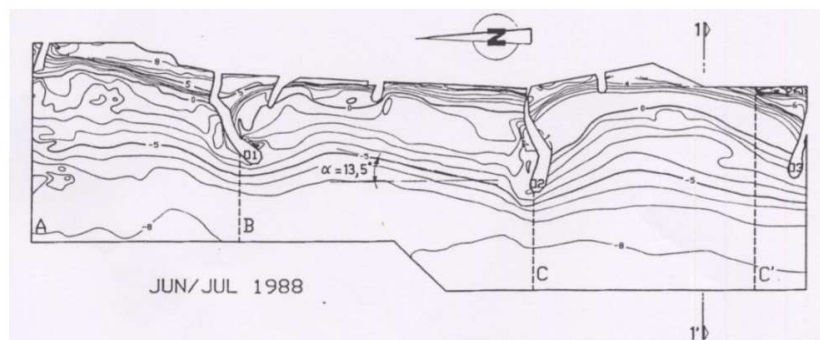


Figura 5.8 - Representação do levantamento usado para a modelação (Mota Oliveira, 1991)

Utilizando o *software* ArcMAP, foram trabalhados os levantamentos de forma a criar um ficheiro do tipo (.xyz) de entrada de dados para batimetrias no *software* SMC. Foram também criados os ficheiros altimétricos dos actuais esporões e ignorados os pequenos esporões que em 1988 ainda existiam como se pode ver pela figura 5.8. anterior. Estes esporões foram reproduzidos admitindo uma cota do coroamento constante de +6,0 metros (ZH), usando também o programa ArcMap. O quebramar destacado projectado por Perreira (2008) foi adicionado à batimetria-base já usando ferramentas do SMC, nomeadamente o MMT para a criação de um polígono com as características descritas em 5.2.1..

O SMC usa o *software* Surfer (programa satélite de apoio ao cálculo), para interpolar os dados do ficheiro (.xyz) e gerar uma batimetria. Este cálculo pode ser de três tipos, interpolação com triangulação linear, distância inversa a uma potência, e ainda o kriging. No primeiro, é usada a triangulação de Delaunay, em que o algoritmo cria triângulos desenhando linhas entre os pontos de dados. Os pontos originais são ligados de tal maneira que os triângulos nunca se interceptam. O resultado é uma malha de triângulos. Este método interpola de forma exacta. Cada triângulo define um plano definido pela cota dos três pontos originais que formam o triângulo. A distância inversa a uma potência, é um método interpolador de pesos ponderados que é em geral muito rápido. Os dados são pesados ou ponderados durante a interpolação de forma a que a influência de um ponto relativamente a outro diminui consoante a distância entre estes. Finalmente o kriging, é um método geoestatístico que produz em geral mapas com melhor aparência, pois consegue perceber uma sugerida tendência dos dados, de forma a que, por exemplo, pontos de cota elevada sejam ligados em vez de isolados (bull's-eye, criados geralmente pela distância inversa a uma potência). Pelos resultados obtidos, foi escolhida a última opção, ou seja, o kriging, pois revelou melhor eficácia para reproduzir os contornos dos esporões norte e sul. Foi usada uma malha de kriging de com um incremento de 5 metros tanto em x como em y.

6

SIMULAÇÕES DO CASO DE ESTUDO

6.1. INTRODUÇÃO

Nos capítulos 4 e 5 foram apresentadas as características do *software* SMC e as características do caso de estudo. Neste capítulo, e usando como base os dois capítulos anteriores, serão apresentados os resultados das simulações efectuadas, comentando e analisando as diferenças entre elas. Pretende-se avaliar o comportamento do quebramar destacado projectado por Pereira (2008), para a frente marítima de Espinho, para diferentes características de agitação, nível de maré, e duração da simulação. Em relação às características da agitação, serão realizadas simulações tanto com agitação regular como com agitação irregular. Para o primeiro caso serão testados várias alturas de onda, período e direcção de agitação e no segundo irá ser simulado o espectro direccionado e o espectro TMA com diferentes parâmetros característicos, nomeadamente a frequência de pico e altura de onda significativa. Para o estudo do transporte dos sedimentos será usado apenas o método descrito no capítulo 4, Soulsby (1997), já que com o outro método, Bailard (1981), foi impossível obter resultados satisfatórios, apesar do interesse que poderia existir na comparação dos dois métodos. Este problema poderá ter origem nas características da batimetria, na sua conjugação com as características dos sedimentos da área em estudo e com as acções definidas para a agitação. Todas as simulações efectuadas são do tipo evolução morfológica, ou seja, existe uma evolução no tempo tanto da batimetria como do evento em curso. Se as simulações tivessem sido do tipo estudo de acreção-erosão inicial, teria sido feito um cálculo do transporte dos sedimentos com a agitação e correntes iniciais, sem evolução da batimetria da praia. Por defeito, os eventos no *software* Mopla terão a duração de 12 horas, mas serão efectuadas para um caso, eventos de 48 e 72 horas. Todas as representações das simulações encontram-se alinhadas com o norte. Será também efectuado um estudo com a existência de um tómbolo alimentado artificialmente a sotamar do quebramar destacado.

Inicialmente será usada a batimetria-base, ou seja, sem o quebramar destacado, tentando retratar a situação actual e real da zona do caso de estudo para também, de certa forma, se verificar se o modelo se está a comportar de forma satisfatória. Posteriormente, irá ser adicionado à batimetria-base o quebramar destacado projectado por Pereira (2008), de acordo com as características já descrita no capítulo 5. Os comentários referentes às simulações de agitação regular são feitos em duas fases, ou seja, inicialmente são comentadas e descritas as figuras que estão presentes neste capítulo, e só depois de forma conjunta são comparadas com as simulações que aparecem em anexo (Anexo A - simulações com a batimetria-base e Anexo B - simulações com quebramar destacado), sendo comentados, por exemplo, valores máximos e mínimos para os vários parâmetros dentro desse conjunto de simulações, e também a influência de cada variável no resultado da simulação. No caso de agitação irregular, por

serem menos simulações, já é possível referir simultaneamente, os casos apresentados e também aqueles que estão em anexo. Para as simulações sobre a batimetria que inclui o quebramar destacado, as análises terão também em consideração comparações para o caso base, visto ser este um dos objectivos do estudo.

6.2. SIMULAÇÕES UTILIZANDO O SOFTWARE MOPLA

6.2.1. SIMULAÇÕES COM BATIMETRIA-BASE

Neste ponto irão ser analisadas as simulações referentes à batimetria-base de Espinho considerada, descrevendo, inicialmente os diversos gráficos referentes ao *software* Mopla para a agitação regular e comentando as simulações deste tipo de agitação, passando depois para a descrição das simulações com agitação irregular e apresentando os espectros usados.

Antes de ser efectuada a análise das simulações, e para enquadrar melhor o problema, usando as potencialidades do módulo Mopla é possível criar representações tanto a duas dimensões como a três dimensões da batimetria-base. Deste modo, a figura 6.1. representa a batimetria a duas dimensões, e a figura 6.2. a batimetria a três dimensões.

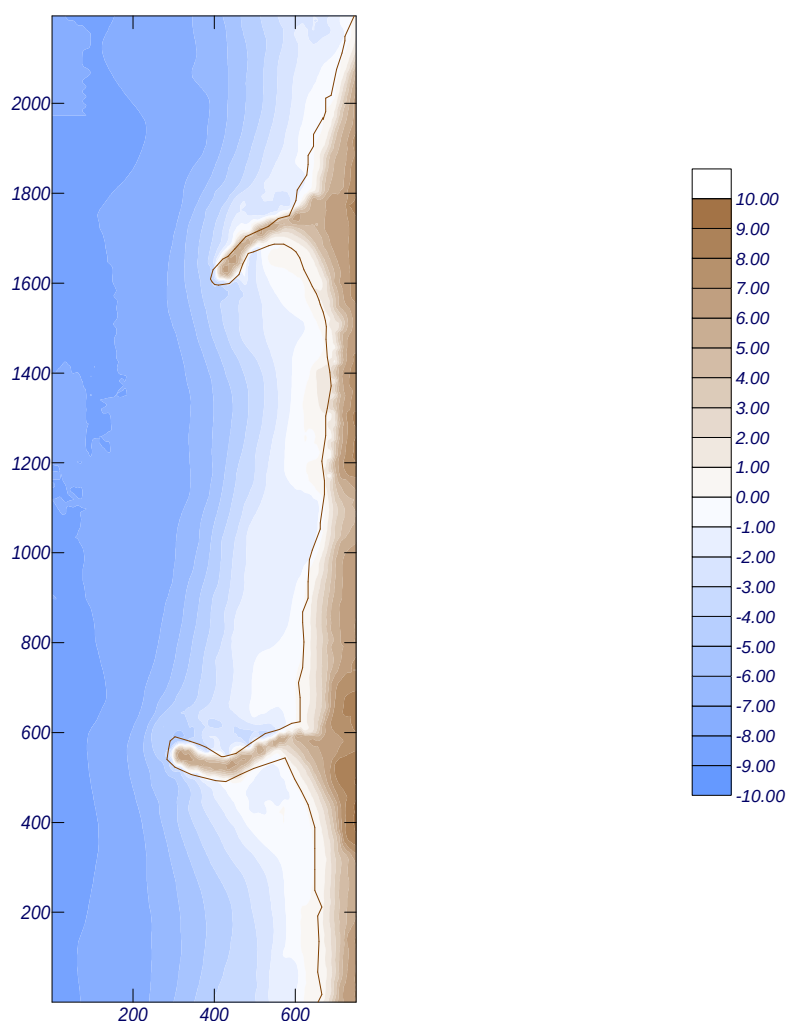


Figura 6.1 - Representação em duas dimensões da batimetria-base (metros, ao ZH)

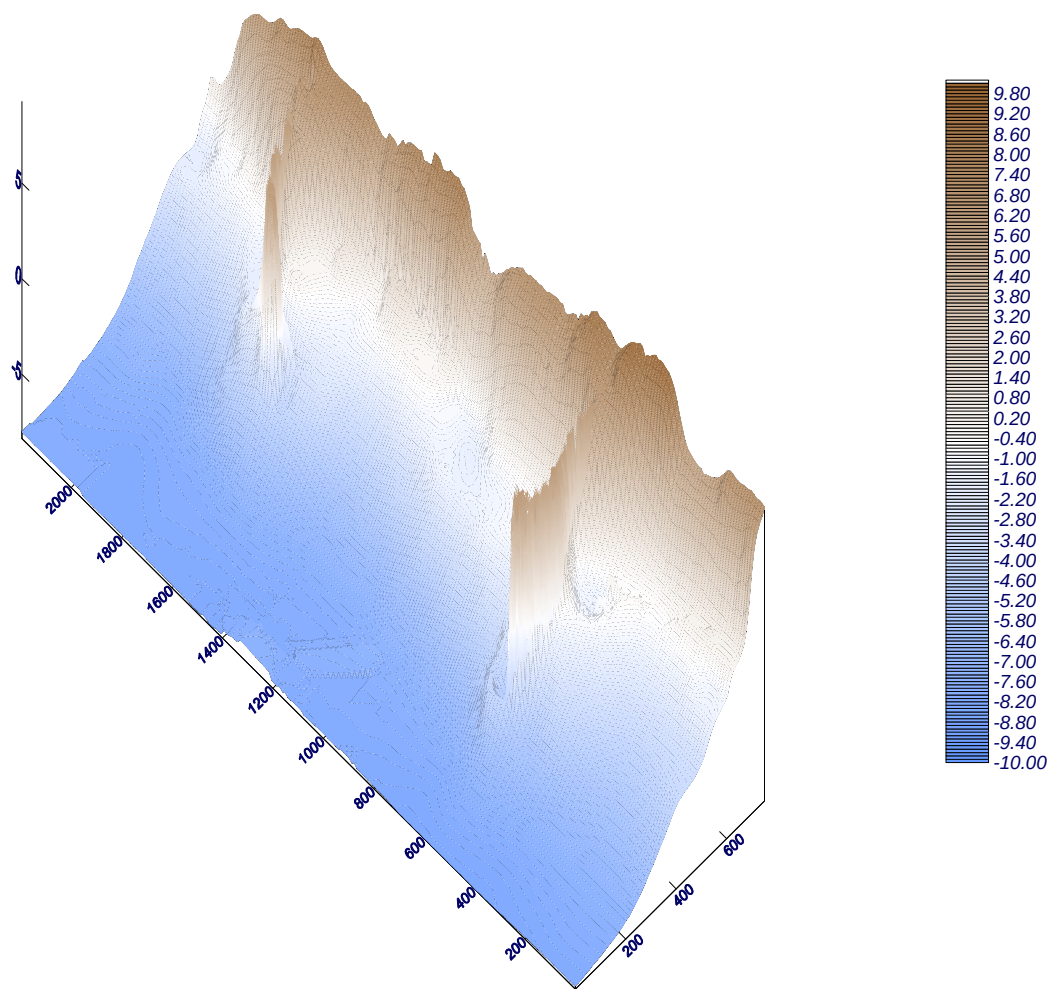


Figura 6.2 - Representação em três dimensões da batimetria-base (metros, ao ZH)

O quadro 6.1 reproduz os dados referentes às simulações sobre a batimetria-base usando agitação regular. Cruzando estes dados é possível definir 16 combinações, que correspondem às 16 simulações efectuadas.

Quadro 6.1 - Dados considerados nas simulações com a batimetria-base, usando agitação regular

Nível de Maré (m)	Altura de Onda (m)	Período (seg)	Orientação da Agitação
+4,0 (ZH)	2	12	NW
0,0 (ZH)	5	18	W

Nestas simulações foram tomadas algumas opções quanto ao modelo de agitação e de correntes, tendo sido escolhidas as opções por defeito propostas pelo programa. Para a agitação foi considerado um modelo do tipo composto, dissipação por camada limite turbulenta, e contornos laterais abertos. No

caso das correntes, foram tomadas simulações com tempo total de 500 segundos, rugosidade de Chezy de $10 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, e a viscosidade turbulenta (*eddy viscosity*) de $10 \text{ m}^2/\text{s}$ e $6 \text{ m}^2/\text{s}$, para 18 segundos e 12 segundos de período, respectivamente.

Para a agitação irregular, apenas foram feitas 4 simulações, com base nos valores do quadro 6.2. A escolha de um único valor para a maré de +4,0 metros (ZH) deve-se ao facto de se pretenderem apenas simular as situações que em princípio serão mais gravosas, e também porque o Oluca-SP, correspondente à agitação irregular, considera uma amplitude de maré e não um nível de maré fixo.

Quadro 6.2 - Dados considerados nas simulações com a batimetria-base, usando agitação irregular

Amplitude de Maré	Altura de Onda Significativa (m)	Período de Pico (seg)	Orientação principal da Agitação
+4,0 (ZH)	2	12	N65°W (+/- 25°)
	5	18	

Da mesma forma que para as simulações com agitação regular, nas simulações usando agitação irregular também foram feitas algumas opções quanto ao modelo de agitação e correntes. Mais uma vez usando as opções por defeito propostas pelo *software*, o modelo de agitação foi do tipo composto, a dissipação por rotura foi do tipo Thornton e Guza, na dissipação por fundo foi escolhida a opção camada limite turbulenta, e contornos laterais abertos. Para o modelo de correntes foi considerado o mesmo intervalo de 500 segundos, e como parâmetros físicos a rugosidade de Nikuradse 1,0 metro, e a viscosidade turbulenta (*eddy viscosity*) igual a $13 \text{ m}^2/\text{s}$ e $8 \text{ m}^2/\text{s}$ para 18 segundos e 12 segundos, respectivamente, de período de pico.

As dimensões dos espaçamentos entre linhas horizontais e verticais da malha de cálculo do *software* Mopla, utilizadas para efectuar estas simulações, dependem essencialmente do período de onda considerado. Quanto maior o período, maiores terão de ser os espaçamentos, resultando numa malha menos densa. O programa necessita de pelo menos 10 filas por comprimento de onda, ou seja, o espaçamento entre as colunas e linhas das malhas terá de ser a próximo da décima parte do comprimento de onda. Assim, para as 16 simulações referidas, foram utilizadas duas malhas de dimensões aproximadamente iguais a 2195x750 metros, tendo as correspondentes a período de 12 segundos divisões horizontais espaçadas de 12,62 metros (175 espaços) e verticais espaçadas de 12,72 metros (60 espaços), enquanto que as simulações com o período de 18 segundos têm uma malha com divisões horizontais espaçadas de 19,96 metros (111 espaços) e verticais espaçadas de 19,76 metros (39 espaços).

Das 16 simulações com agitação regular, foi seleccionada uma para que sejam apresentados os esquemas gráficos de output do Mopla, estando os restantes incluídos no anexo A. Esta simulação referente ao nível de maré de +4.0 metros (ZH), com altura de onda de 2 metros, período de onda de 18 segundos e orientação da agitação de noroeste, poderá ser um bom exemplo de um clima de agitação médio para o local em questão. O Mopla, como já foi referido no capítulo 4, é composto por três modelos, o Oluca referente à propagação da agitação, o Copla referente às correntes, e o Eros referente ao transporte de sedimentos, ou seja, erosão-acreção. Cada um destes modelos calcula e gera um conjunto de representações gráficas que vão ser agora apresentadas e comentadas para a simulação referida. É importante referir que nem todos os outputs gráficos serão expostos e comentados, pois isso geraria um grande número de resultados que, tendo em conta o número de simulações, ultrapassaria o âmbito e os objectivos deste trabalho.

Começando pelo Oluca-MC, é possível obter nove representações diferentes, que são a variação espacial de altura de onda, os vectores principais de agitação, os conjuntos vectores agitação-magnitude e vectores agitação-topografia, a variação espacial da fase da onda, as frentes de onda, a superfície livre 3D, e os conjuntos de frentes de onda-altura de onda e frentes de onda-topografia. Nas representações conjuntas, os esquemas são sobrepostos para se verificar se existe alguma relação ou não entre os dados correspondentes.

Na figura 6.3a) e 6.3b), estão representados, respectivamente, os gráficos referentes à variação espacial das alturas de onda e frentes de onda. Como é de fácil análise, as alturas de onda são influenciadas pelos obstáculos à agitação formados pelos esporões norte e sul, assim como pela irregularidade batimétrica, ou seja, a refração. Da mesma forma, as frentes de onda apresentam discontinuidades apenas nos obstáculos como os esporões.

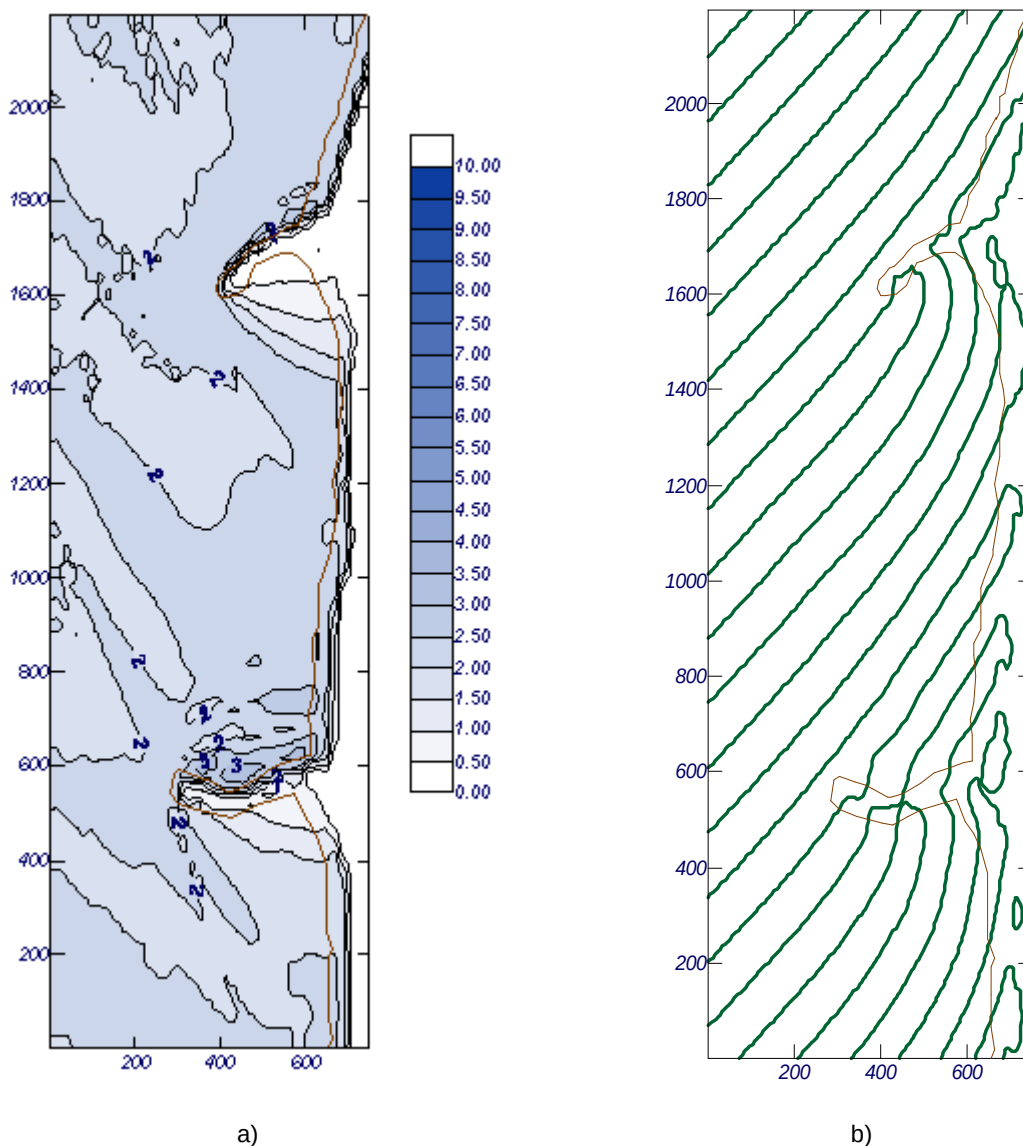


Figura 6.3 - a) Variação espacial das alturas de onda, b) Frentes de onda

Na figura 6.4a) e 6.4b) estes aspectos são ainda de melhor visualização pois estão sobrepostas a topografia e as frentes de onda, assim como as frentes de onda e as alturas de onda.

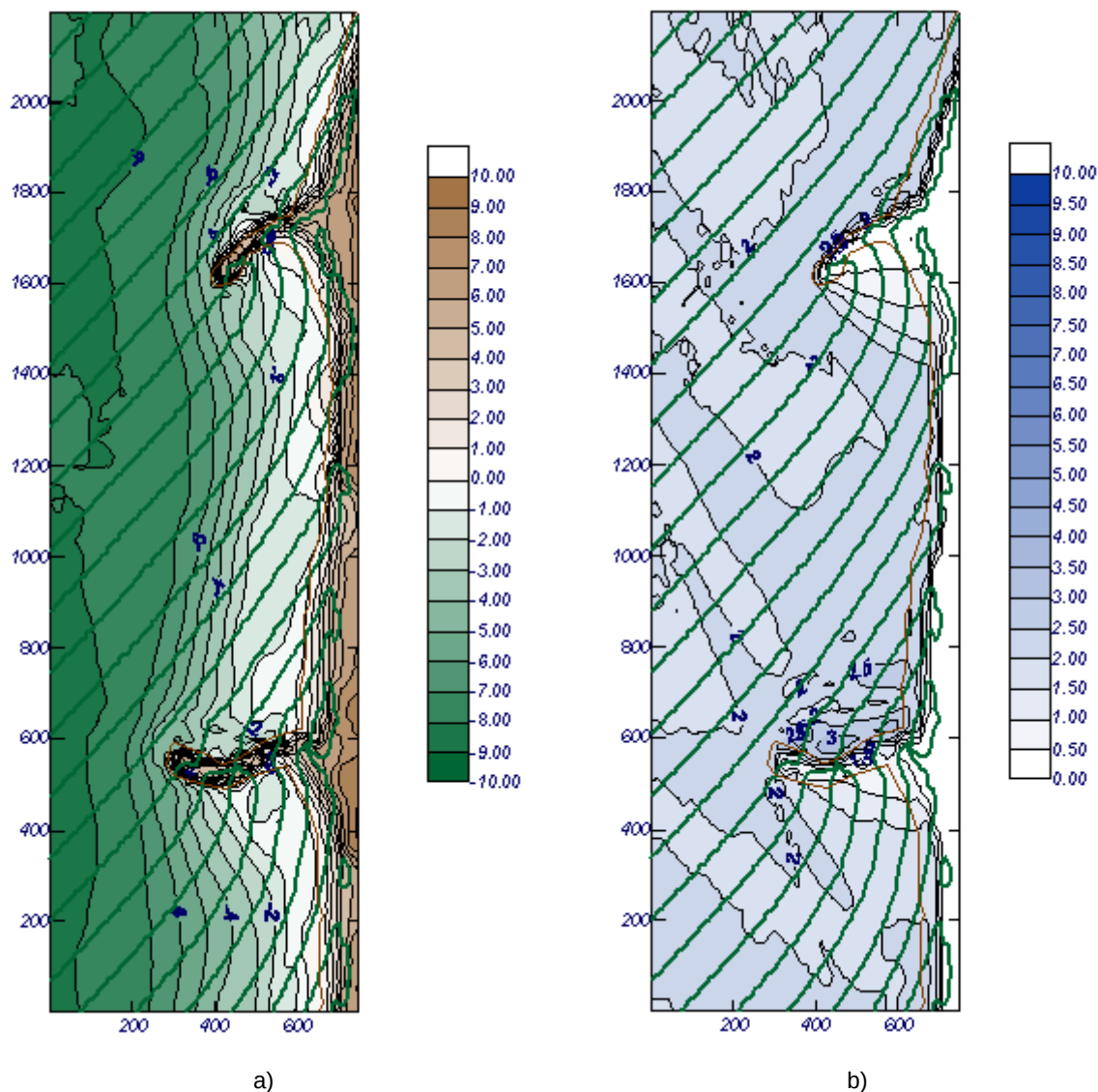


Figura 6.4 - a) Alturas de onda e frentes de onda sobrepostas, b) Frentes de onda sobrepostas à batimetria

Na figura 6.5a), onde estão representados os vectores agitação-magnitude e na figura 6.5b) os vectores agitação-topografia, é notória a influência dos esporões na protecção a sotamar da estrutura, sendo nítida a zona de sombra originada. Nesta zona os vectores são obviamente de menores dimensões, e logo, para a figura referente à magnitude, é representada por uma cor mais suave e próxima do branco. Naturalmente que o mesmo se passa para a figura referente à topografia. Propositadamente existe uma diferença entre estes dois gráficos, no que diz respeito à densidade de vectores. No referente à magnitude existe uma menor densidade de vectores quando comparado com o referente à topografia. Serve isto para demonstrar a possibilidade que o *software* permite relativamente à densidade pretendida, no que diz respeito a vectores e também, como se verá mais à frente, aos vectores corrente

e transporte. Esta funcionalidade poderá ser importante em certas situações, para salientar melhor algum aspecto específico.

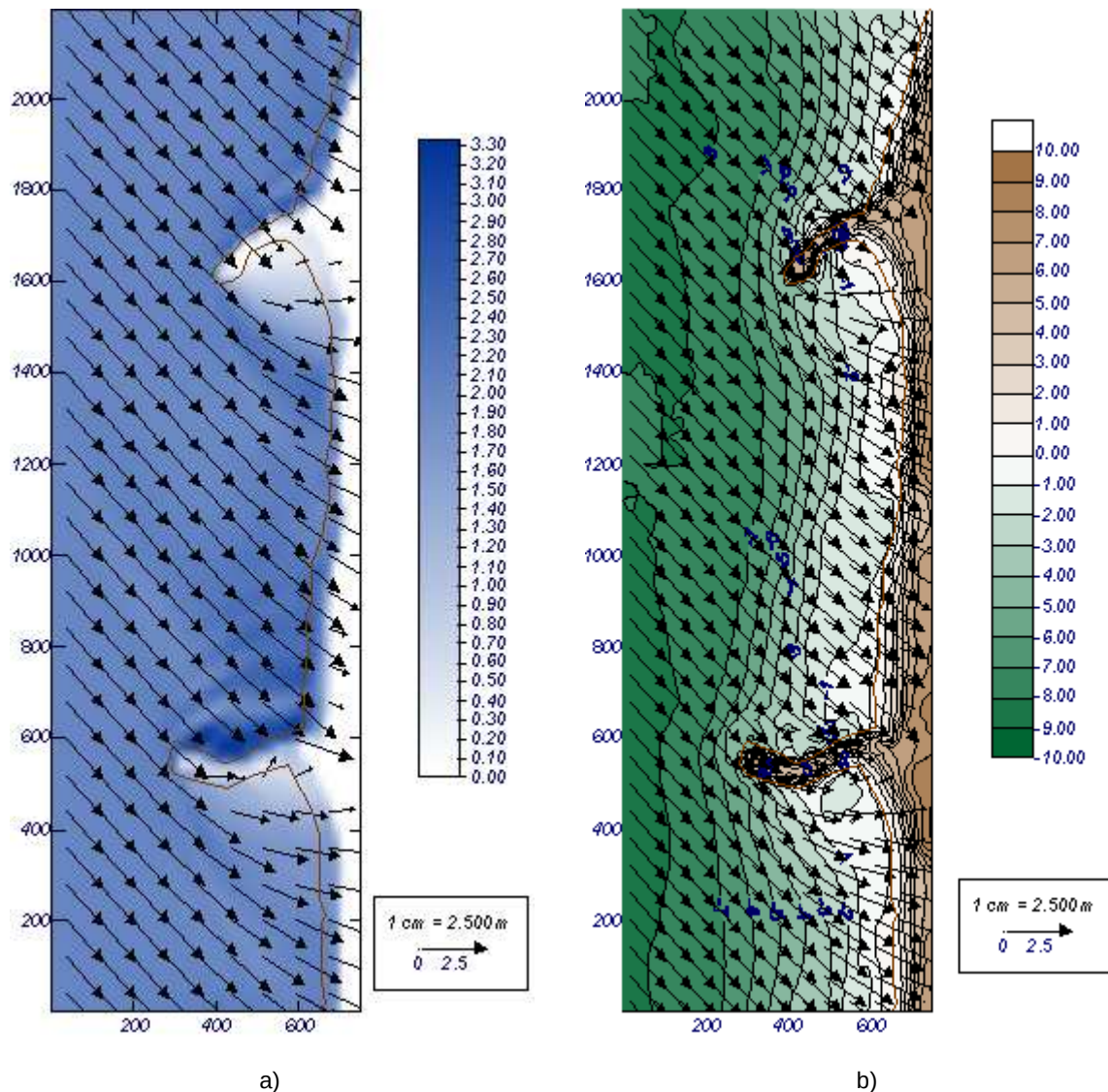


Figura 6.5 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Vectores agitação-topografia

A variação espacial da fase da onda para esta simulação está representada na figura 6.6. Como se percebe pela análise da figura, tem características semelhantes à representação das frentes de onda, figura 6.3b), notando-se igualmente o efeito da difracção das ondas causada pelos esporões.

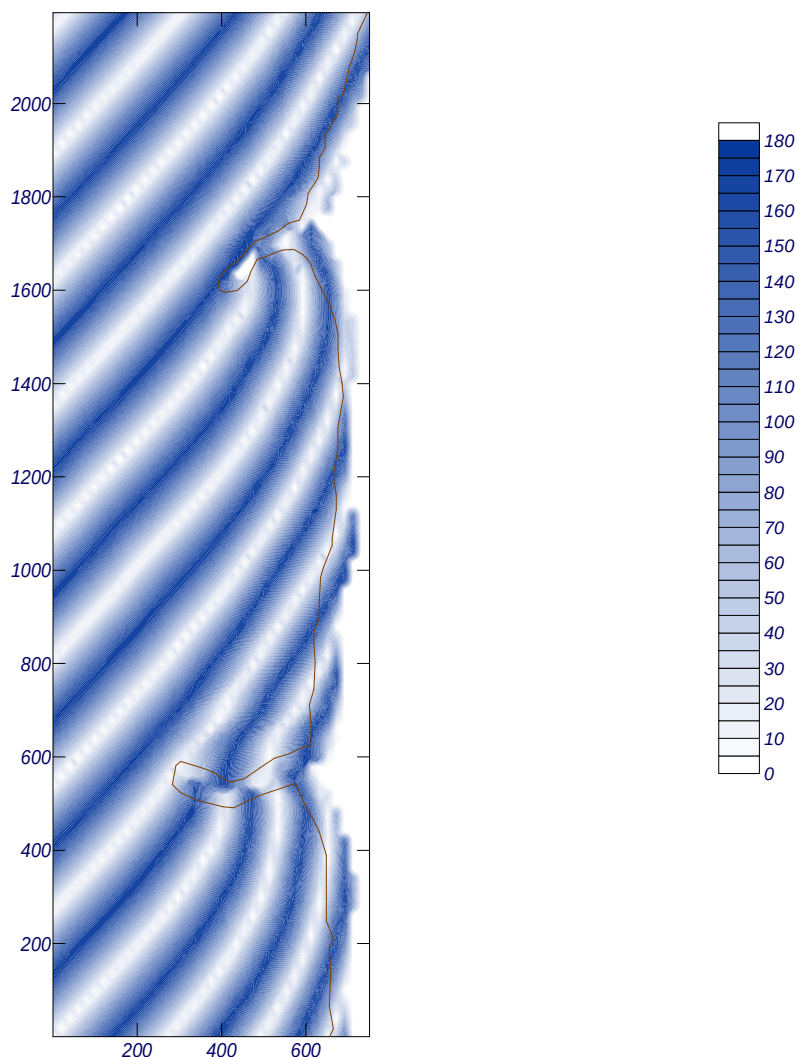


Figura 6.6 - Variação espacial da fase da onda

O Copla-MC gera seis representações distintas, os vectores corrente, os conjuntos vectores corrente-topografia, vectores corrente-magnitude, e vectores corrente-altura de onda, e ainda os níveis médios a duas e três dimensões.

Na figura 6.7a) e 6.7b) estão representadas duas destas seis representações, respectivamente, os vectores corrente-magnitude, e os vectores corrente-topografia. Nestes, ao contrário dos gráficos representados na figuras 6.5a) e 6.5b), a densidade dos vectores é a mesma. Com a agitação de noroeste usada nesta simulação é clara a maior intensidade de correntes a barlar dos esporões, e também na zona central da faixa entre os dois quebramares. Esta zona central, como já foi referido no capítulo 5, é das zonas que apresenta maiores problemas em termos de erosão. Na legenda é possível ver a correspondência entre a dimensão dos vectores e a velocidade, velocidade esta que é a média das velocidades em profundidade e no tempo. A representação 6.7b), onde estes vectores estão sobrepostos à topografia poderá tornar-se confusa e de difícil interpretação.

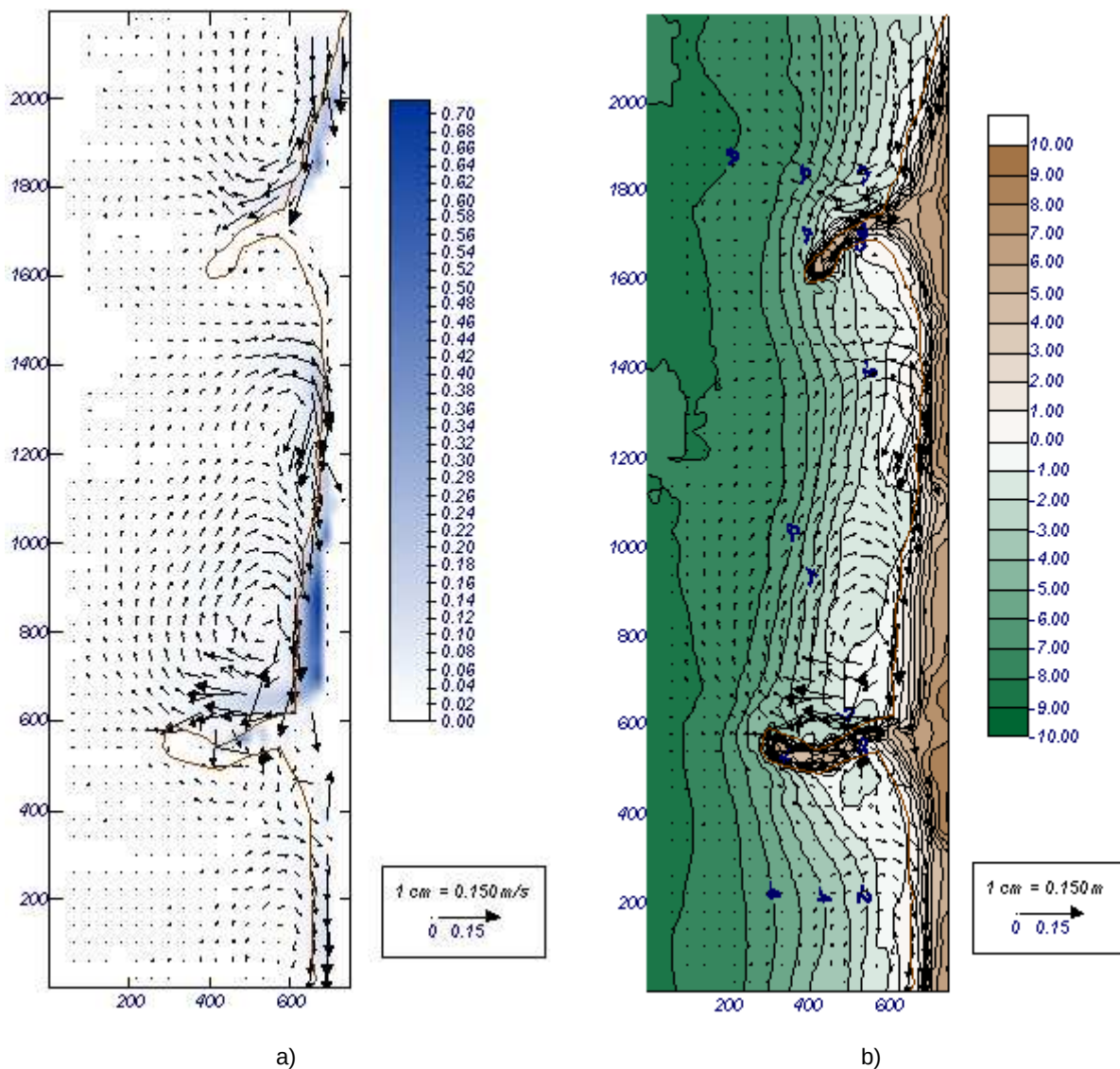


Figura 6.7 - a) Vectores corrente-magnitude, b) Vectores corrente-topografia

Por fim e referentes ao transporte, no modelo Eros-MC, são geradas quatro representações, duas referentes à erosão-acreção inicial, o vectores transporte potencial-magnitude e a topografia inicial- variação inicial da topografia, e duas referentes ao estado final, a topografia inicial-final e também a topografia final-variações do fundo.

Os dois primeiros, figura 6.8a) e 6.8b), dizem respeito à erosão-acreção inicial. No gráfico dos vectores transporte-magnitude, 6.8a), confirma-se o que já se registara nos vectores corrente, ou seja, as zonas a barlarmar dos esporões, e a zona central entre eles, são as zonas com mais elevado transporte potencial. No outro gráfico, 6.8b), referente à topografia inicial-variação inicial, e como o evento é de curta duração e com ondas de 2 metros, as variações são de pequena expressão, situando-se em níveis próximos do zero.

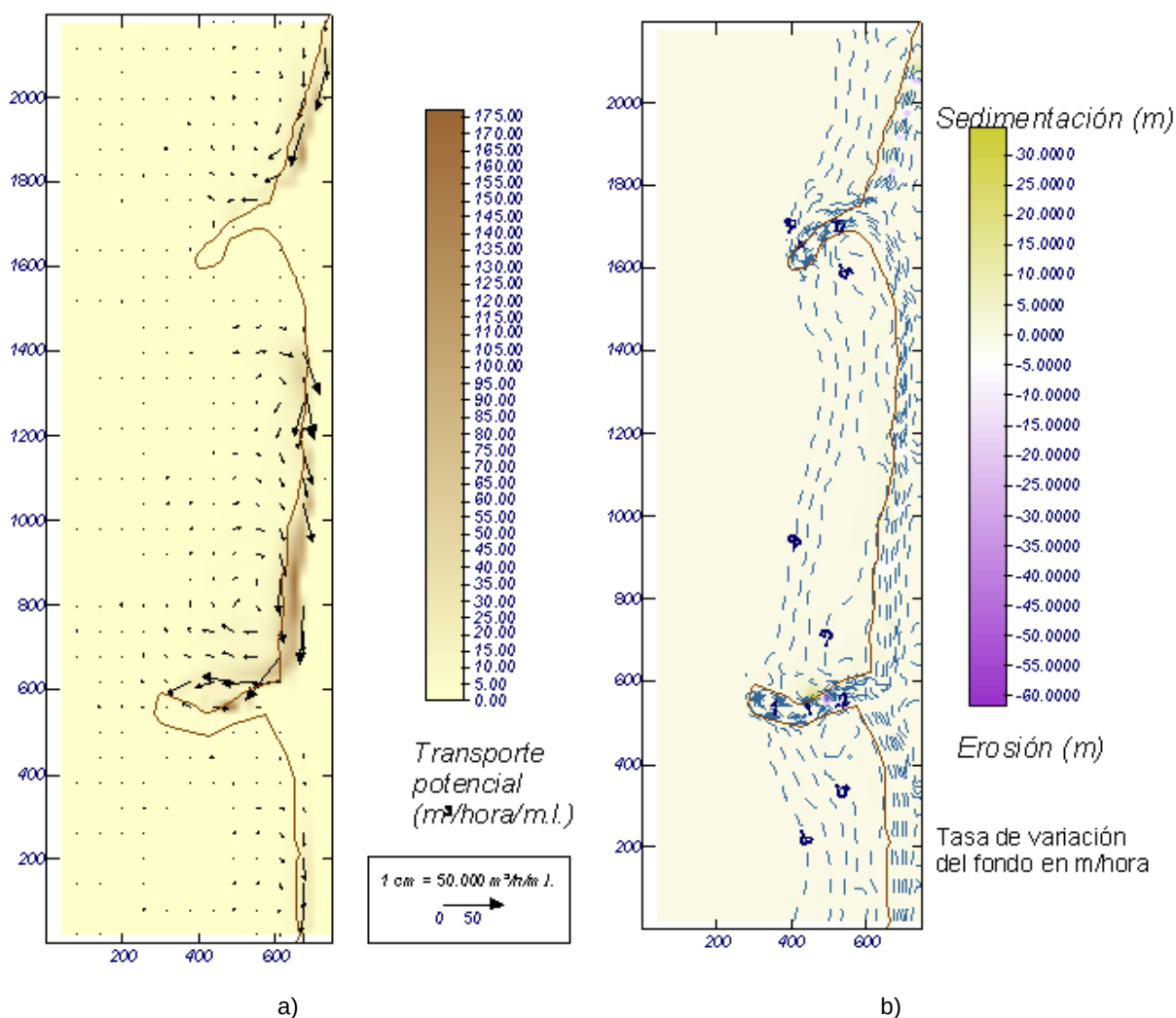


Figura 6.8 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Topografia inicial-variação inicial

A figura 6.9a) refere-se ao gráfico variação da batimetria e a figura 6.9b) à topografia final-variação da topografia. Em 6.9a) é apresentada a variação da topografia durante o evento de 12h com as características já descritas, estando a traço interrompido as batimétricas iniciais e a cheio as novas batimétricas. As zonas onde ocorrem maiores mudanças foram a norte do esporão norte e na zona central entre os esporões. Em relação à representação da esquerda, onde se pode ver a batimetria final, pode-se concluir que em geral, à excepção de pequenas zonas mais claras, indiciadoras de acreção, toda a zona estaria sob o fenómeno com erosão ou de baixos níveis de acreção.

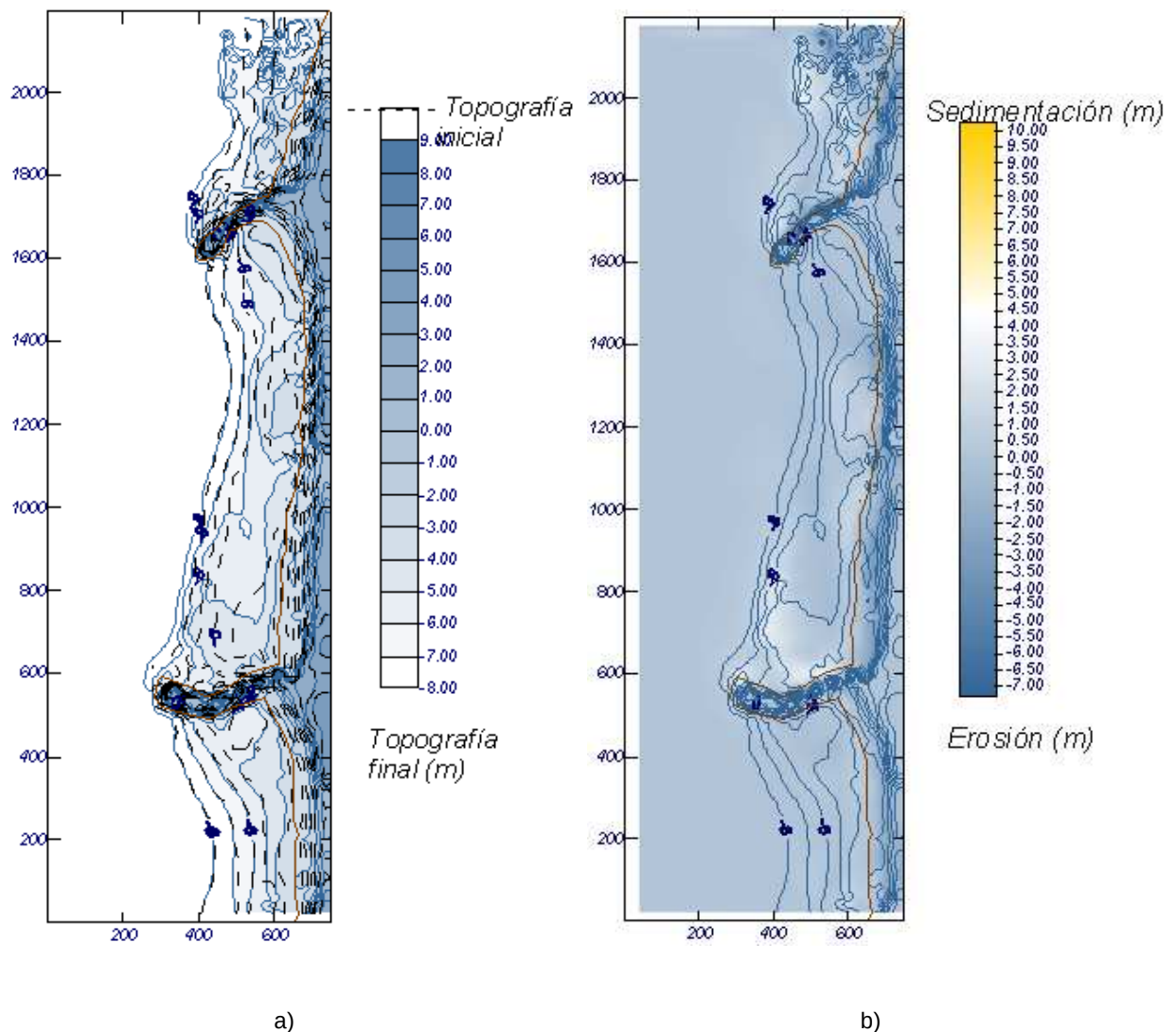


Figura 6.9 - a) Variação da batimetria, b) Topografia final-variação da topografia

Com estes dois últimos gráficos conclui-se a apresentação desta simulação, sendo agora oportuno iniciar uma análise comparativa entre as diversas simulações sobre a batimetria-base usando agitação regular.

Começando pela análise dos resultados referentes ao Oluca-MC, ou seja, à propagação da agitação, as alturas de onda são um dado importante e de interesse para qualquer estudo. A partir da análise dos vários gráficos, apresentados no anexo A, é possível concluir que a variável período de onda tem uma influência nula ou quase nula na distribuição das alturas de onda, enquanto que todos os outros parâmetros influenciam a variação das alturas de onda. No caso do nível de maré, poderá observar-se uma translação das regiões com diferentes alturas de onda na direcção da costa, verificando-se uma extensão das regiões com maiores alturas de onda e um movimento das menores alturas de onda para maiores cotas na junto à costa, ou seja, um movimento de oeste para este. Quanto à altura de onda incidente, que é sem dúvida o parâmetro que mais influencia a variação espacial das alturas de onda, pois para além da óbvia mudança dos valores máximos de altura de onda, ocorre uma diminuição mais rápida destas com a proximidade da linha de costa, devido aos limites físicos da altura de ondas com as profundidades do local em questão e devido ao efeito da refacção. Finalmente, o aspecto da

orientação da agitação é também notório na análise dos gráficos, especialmente ao largo dos esporões, já que na baía entre estes, as diferenças são muito pequenas.

No que diz respeito às frentes de onda, e como seria de esperar, o aspecto que mais as influencia é a orientação da agitação ao largo, sendo clara a diferença entre agitação de oeste ou noroeste. As frentes de onda serão então perpendiculares a cada uma das orientações. O período de onda tem uma influência também óbvia, que se verifica na maior distância entre as várias frentes, ou seja, quanto maior o período de onda, maior será o comprimento de onda e o espaçamento entre as frentes de onda. A altura de onda pouco influencia a frente de onda, notando-se talvez uma diminuição da distância entre frentes junto à linha de costa. Um maior nível de maré leva as frentes a atingirem cotas maiores na linha de costa e também a uma manutenção do espaçamento entre elas. Finalmente, a influência dos esporões é notória pois provoca, através da difracção, uma rotação das frentes de onda, especialmente nos casos em que a agitação é de noroeste.

A fase, é também muito influenciada pelo período de onda, sendo que quanto maior for este, maior serão os espaçamentos entre as linhas com a mesma fase. A maré também influencia da mesma forma a fase, pois quanto maior o nível de maré, também maior o espaçamento entre linhas com a mesma fase, sendo que para além disso, se o nível de maré for maior não acontece uma diminuição tão brusca, na direcção da linha de costa, do espaçamento entre estas linhas, facto associado também ao efeito da refração. Os esporões provocam, da mesma forma que em relação às frentes de onda, uma difracção das linhas de igual fase, enquanto que a altura de onda pouco influencia este parâmetro.

Por fim, os vectores-magnitude, são obviamente influenciados pela direcção da agitação, pois estes tomam aproximadamente a direcção paralela à direcção definida para a agitação. Com a maré, apenas atingem cotas superiores para níveis de maré superiores. A altura de onda é o parâmetro principal desta representação gráfica do Oluca-MC, visto que os vectores serão tanto maiores quanto maior for a altura de onda, e também mais escuro será o azul, para maiores alturas de onda. Os esporões, para além de provocarem uma diminuição no tamanho e magnitude dos vectores a sotamar, também demonstram uma maior intensidade do lado de barlar, especialmente para os casos de agitação de noroeste, resultando isto num azul de maior intensidade.

Como resultados do Copla-MC, irão ser discutidos apenas os gráficos referentes aos vectores corrente-magnitude, visto que são os de mais clara análise, e que contêm toda a informação que interessa analisar. Posto isto, e tendo em conta o parâmetro orientação, é notória a diferença de comportamento especialmente na zona entre os esporões, onde se verifica que para agitação de noroeste existe uma maior uniformidade, ou seja, como que uma corrente única ao longo da costa, quase paralela a esta, formando uma única zona de recirculação apenas afectada pelos esporões. Na situação de agitação de oeste, são formados várias pequenas zonas de recirculação ao longo de toda a zona entre os esporões, a norte do esporão norte observa-se uma corrente de sentido sul-norte, e a sul do esporão sul observa-se uma corrente de sentido norte-sul. O parâmetro período de onda deverá ter pouca influência nestes fenómenos, já que não é perceptível, mantendo os outros parâmetros constantes, qualquer diferença entre os gráficos. A altura de onda e o nível de maré têm os efeitos óbvios, de respectivamente, aumentar a velocidade das correntes, e logo a sua magnitude, e de levar estas a atingir maiores cotas provocando uma translação da zona de maior magnitude na direcção de oeste para este. Os valores extremos máximos de velocidade de correntes, são encontrados essencialmente para simulações com orientação noroeste e com altura de onda de 5 metros. Estes valores oscilam entre os 0,5 e 0,6 m/s. Os valores máximos para alturas de onda de 2 metros andam próximos dos 0,25 m/s.

Finalmente, para o Eros-Mc irão ser analisados os gráficos correspondentes aos vectores transporte-magnitude e variação da batimetria. Estas duas representações são as mais elucidativas, e com

resultados mais perceptíveis. Começando pelos vectores transporte, é possível ver uma nítida diferença para os dois níveis de maré, sendo que a faixa onde existe um maior transporte potencial é mais ou menos próxima da linha de costa, consoante o nível de maré é mais elevado ou mais baixo, respectivamente. As zonas de recirculação apresentam diferentes configurações, conforme a agitação for de oeste ou de noroeste. Para a primeira situação existem pequenas e várias zonas de recirculação ao longo da costa entre os esporões, e a norte do esporão norte existe uma zona de transporte de sul para norte, enquanto que a sul do esporão sul se verifica uma zona de maior transporte potencial de norte para sul, formando em ambos os casos duas únicas zonas de recirculação. No caso de agitação predominante de noroeste, é formada uma única zona de recirculação delimitada pelos esporões norte e sul, tendo maior magnitude próximo do esporão sul. Para esta situação, nas zonas a norte e a sul dos esporões, é criado um corredor com uma orientação próxima da orientação da linha de costa, de norte para sul. Enquanto que para ondas de 2 metros se verificam zonas de transporte potencial próximas de $50 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m.l.}$, no caso de ondas de 5 metros estes valores ultrapassam os $200 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m.l.}$, especialmente se conjugadas com períodos elevados, já que também se nota um aumento do transporte potencial com o aumento do período.

Os gráficos correspondentes à variação da batimetria, têm uma maior complexidade e variabilidade com a variação dos diversos parâmetros. Isso deve-se não só às limitações de cálculo do programa, como também à grande dificuldade em prever algo tão complexo, baseado apenas em alguns dados de base. Como primeira análise é possível constatar que o modelo não reagiu bem ao efeito da maré. Este aspecto é visível em todas as oito simulações com o nível de maré +4.0 (ZH) metros, na medida em que apenas são consideradas alterações nas batimétricas mais próximas da linha de costa. Este facto poderá estar relacionado com a profundidade de fecho considerada pelo programa, que limitará a zona em que acontecem alterações às menores profundidades. Outro aspecto que conduziu a resultados algo inesperados foi a conjugação de alturas de onda de 5 metros com períodos de 12 segundos, especialmente para orientações de noroeste. No entanto é possível notar uma tendência clara de maiores alterações nas zonas dos esporões, tanto a sotamar como a barlamar, verificando-se avanços a barlamar e recuos a sotamar, da linha de costa. Para uma agitação de 5 metros existe uma óbvia e maior alteração dos alinhamentos da batimétricas.

Passando agora às simulações com agitação irregular, é importante definir as malhas usadas. Para estas simulações foram usadas malhas com as mesmas dimensões e mesmo ponto de origem das malhas usadas para agitação irregular, mas agora com espaçamentos entre colunas horizontais de 15,14 metros (146 espaços) e 15,01 metros para verticais (51 espaços) para o período de pico de 12 segundos, e para o período de pico de 18 segundos foi usada uma malha com linhas horizontais espaçadas de 23,86 metros (93 espaços), e linhas verticais afastadas de 23,46 metros (33 espaços).

A simulação que se segue refere-se a uma altura de onda significativa de 5 metros, uma frequência de pico de 12 segundos, uma amplitude de maré de 4 metros e como direcção principal N65°W com dispersão de +/- 25°. O módulo Mopla, na sua vertente para agitação irregular, calcula representações gráficas para os espectros a usar nas simulações. Na figura 6.10 está representado o espectro de frequências utilizado, e na figura 6.11 a representação do espectro direccional, ambos referentes à simulação descrita. É também possível representar estes dois espectros de forma sobreposta, tanto a duas como a três dimensões. Nas figuras 6.12 e 6.13 estão representadas estes espectros bidimensionais.

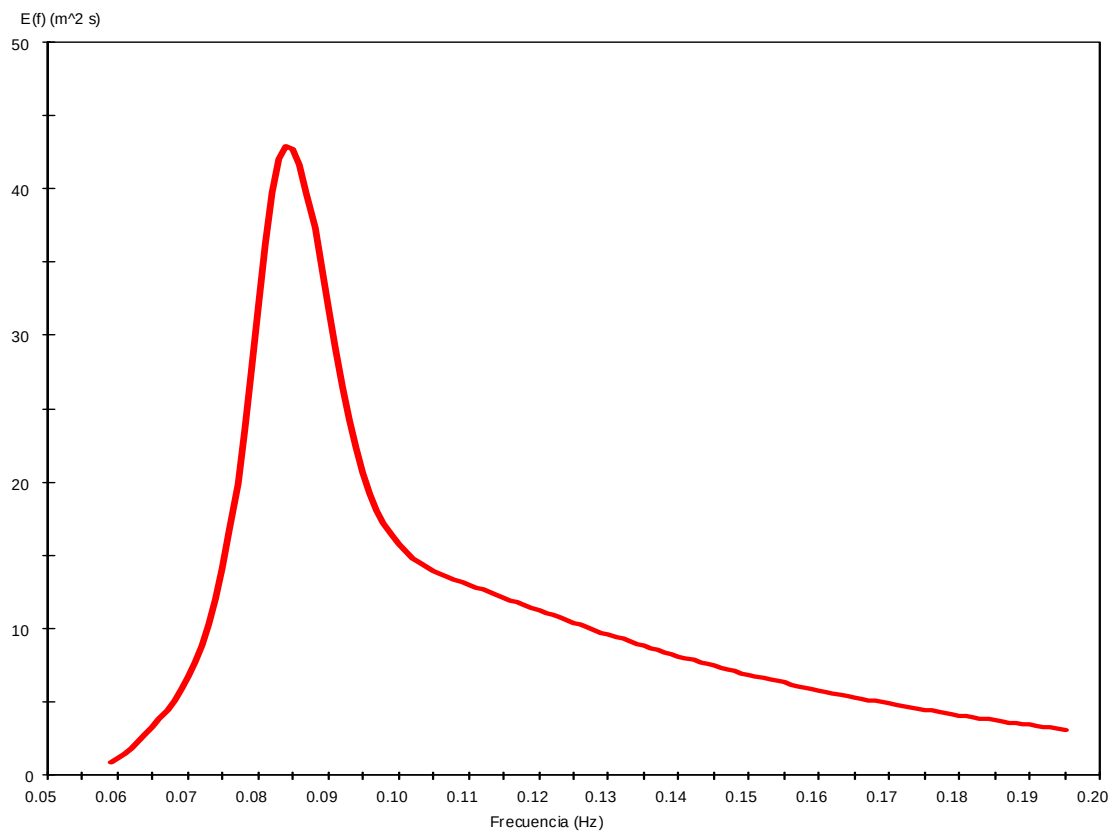


Figura 6.10 - Espectro de frequências ($H_s=5,0$ metros, período de pico 12 segundos, frequência máxima de 0,20 Hz)

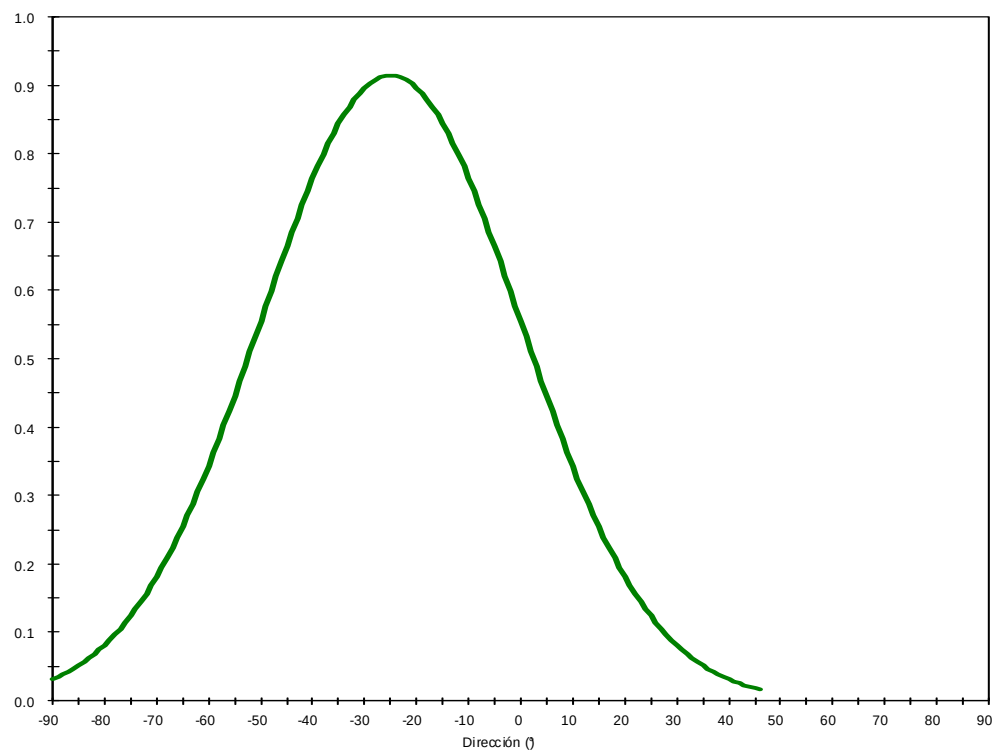


Figura 6.11 - Espectro direccional (N65°W , +/- 25°)

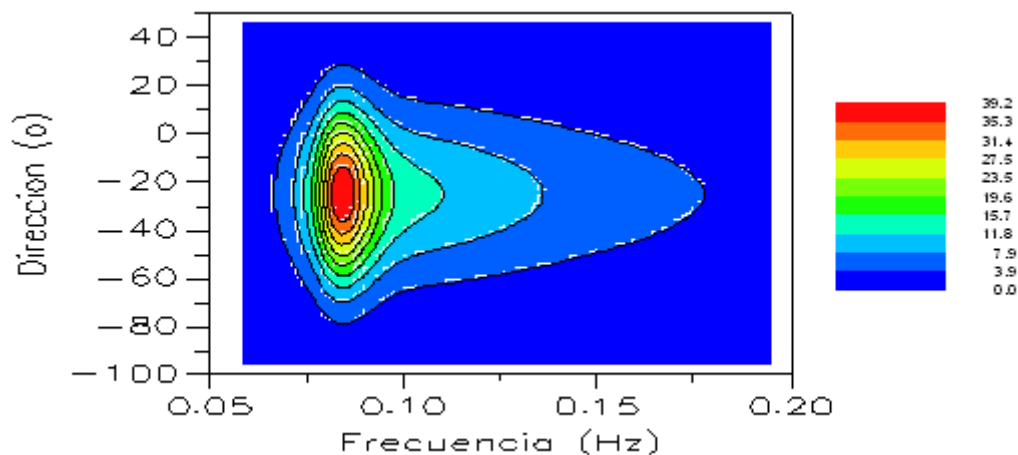


Figura 6.12 - Espectro bidimensional a duas dimensões

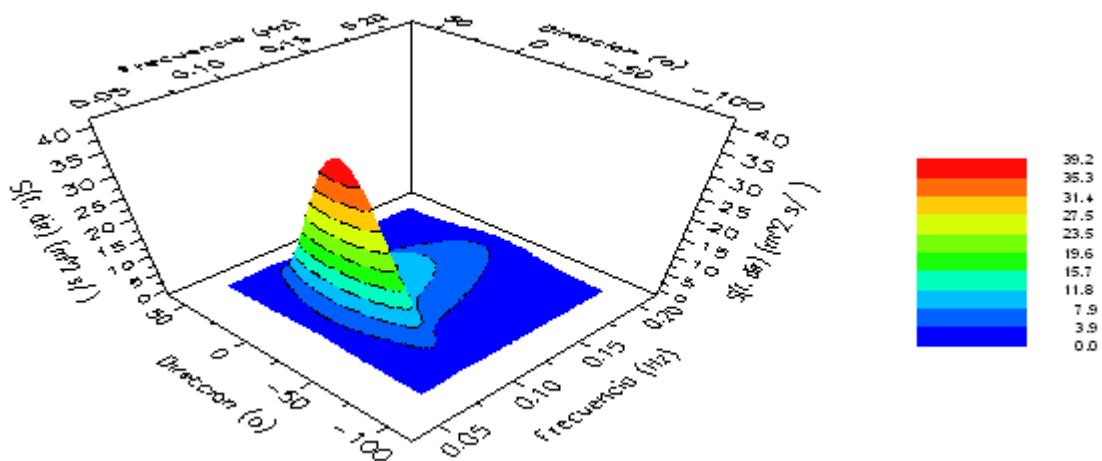


Figura 6.13 - Espectro bidimensional a três dimensões

Tal como para a agitação regular, em que os três modelos geravam vários outputs, para a agitação irregular o Copla e o Eros geram as mesmas representações já referidas para a situação de agitação regular, sendo que apenas no que diz respeito ao Oluca é que existem diferenças. Para este, é possível gerar gráficos de isolinhas de alturas de onda significativas, os vectores referentes à altura de onda significativa, o conjunto destes com a topografia e a magnitude, e ainda a superfície livre a duas e três dimensões.

A figura 6.14a) apresenta os gráficos isolinhas de altura de onda significativas, e a 6.14b) e os vectores corrente-magnitude. Se compararmos estes resultados com as simulações com agitação regular com inputs semelhantes, são notórias as diferenças para o gráfico das isolinhas de altura de onda significativa, onde se produzem melhores resultados, especialmente nas zonas de sombra dos esporões, verificando-se uma clara difracção das ondas e o lógico decréscimo com o aproximar da linha de costa. Se se comparar com as outras simulações de agitação irregular, existe uma lógica diferença para as simulações de 2 metros de altura significativa, que se verifica na altura de onda

máxima. Também no que diz respeito ao período de pico de 18 segundos, é possível ver um estreitamento das faixas referentes às alturas de onda significativas, sobretudo na faixa entre os 4,5 e 4 metros, quando comparadas com simulações com períodos de pico de 12 segundos.

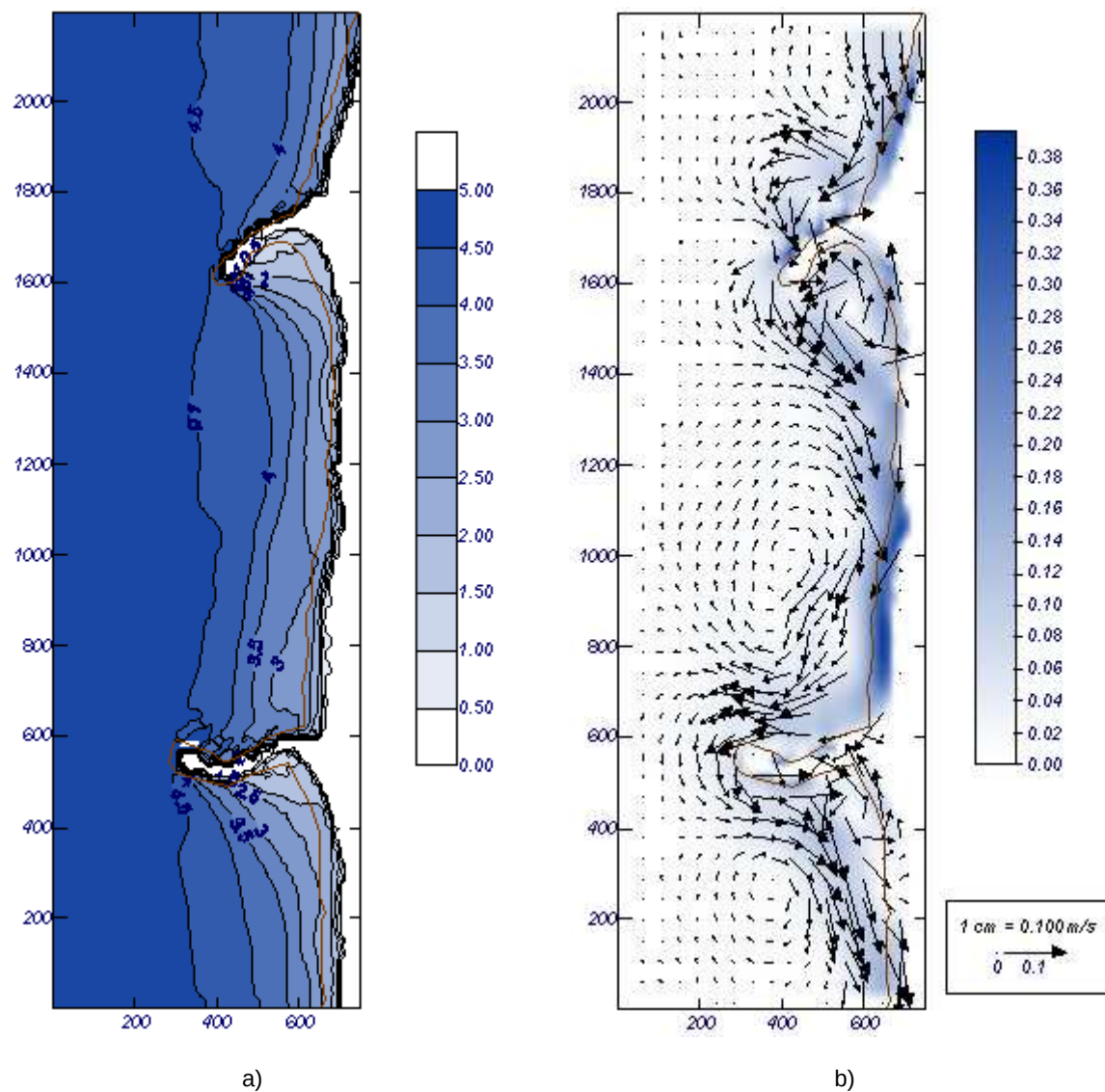


Figura 6.14 - a) Variação espacial das alturas de onda significativas, b) Vectores corrente-magnitude

Sobre a representação dos vectores corrente-magnitude, da análise da figura 6.14b), pode concluir-se que para a agitação irregular o corredor de magnitude máxima está melhor definido, apresentando valores máximos da ordem dos 0,35 m/s, especialmente nas zonas de barlamar dos esporões. Tal como acontecia com as representações de agitação regular de orientação noroeste, forma-se uma grande zona de recirculação entre os esporões. No caso das simulações com altura de onda significativa de 2 metros, os valores máximos de velocidade são da ordem de 0,2 m/s, com especial incidência nos mesmos locais já referidos.

Focando agora a análise na figura 6.15a), referente ao transporte potencial, é também aceitável dizer-se que os resultados apresentam uma maior uniformidade, resultado do espectro direccionado em

substituição de uma única direcção de agitação. Como todas as simulações têm o mesmo espectro direccional, o seu aspecto é algo semelhante ao da figura 6.15a), havendo apenas diferenças nos valores de transporte potencial. O valor máximo acontece para a frequência de pico de 18 segundos e altura de onda significativa de 5 metros, e ronda os $40 \text{ m}^3/\text{hora}/\text{m.l.}$, valor muito inferior ao registado máximo com agitação regular.

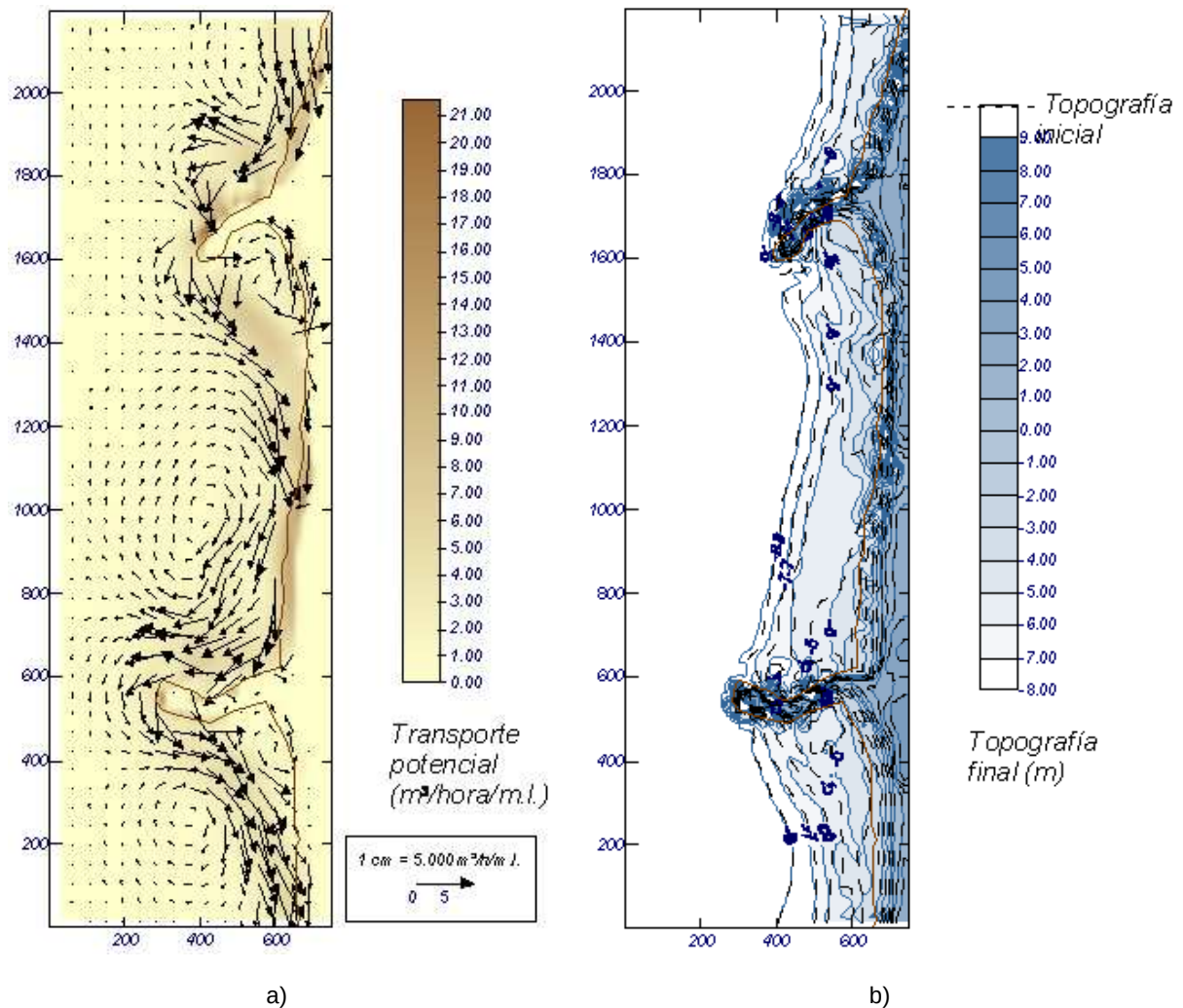


Figura 6.15 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria

A figura 6.15b), que representa a variação das batimétricas, demonstra que as batimétricas de maior valor, ou seja nas zonas mais profundas, têm uma quase variação nula, o que seria de esperar, enquanto que a zona perto da linha de costa apresenta alguma variação, especialmente perto dos esporões. Os resultados parecem mais coerentes, em todas as situações de agitação irregular, com o tipo de evento simulado do que a generalidade dos casos de agitação regular, pois são menos significativas as mudanças verificadas, mesmo para as situações de altura de onda significativa de 5 metros, como é o caso da figura 6.15b). O modelo não reagiu bem ao caso referente ao período de pico de 18 segundos e altura de onda significativa de 5 metros, pois apresentou algumas descontinuidades no cálculo.

6.2.2. SIMULAÇÕES REALIZADAS COM QUEBRAMAR DESTACADO

Terminada a análise com a batimetria real da frente marítima da cidade de Espinho, será agora testada a situação com quebramar destacado proposto e dimensionada por Pereira (2008).

Tal como no ponto anterior, antes de qualquer simulação, é importante definir a batimetria que serve de base considerando já, neste caso, o quebramar destacado. No anexo B estão representadas todas as simulações realizadas com quebramar destacado, à excepção das simulações que são apresentadas neste ponto. Nas figuras 6.16 e 6.17 estão representadas a batimetria-base em duas dimensões e em três dimensões, respectivamente.

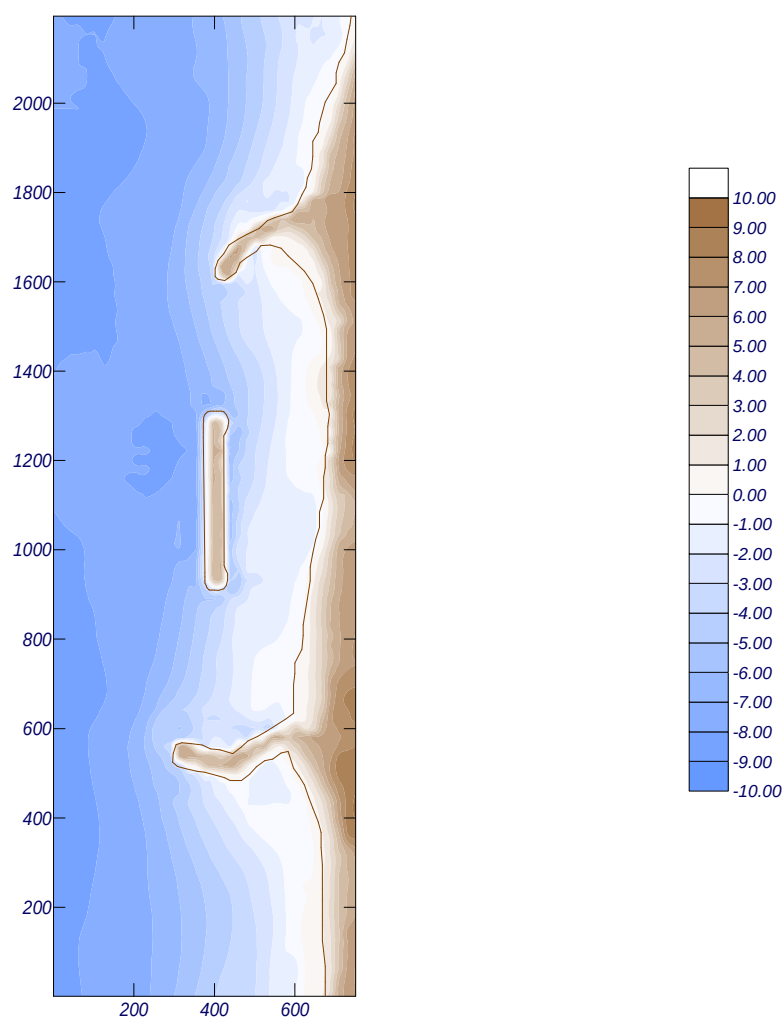


Figura 6.16 - Representação a duas dimensões da batimetria com o quebramar destacado (metros ao ZH)

Mais uma vez, as simulações baseiam-se nos dados apresentados nos quadros 6.1. e 6.2.. As malhas referentes a agitação regular, têm as mesmas dimensões e ponto de origem que as usadas para a batimetria-base e têm as seguintes características: as de período igual a 12 segundos possuem divisões horizontais espaçadas de 12,54 metros (176 espaços) e verticais espaçadas de 12,51 metros (61 espaços), enquanto que as simulações com período de 18 segundos têm uma malha com divisões

horizontais espaçadas de 20,71 metros (107 espaços) e verticais espaçadas de 20,85 metros (37 espaços).

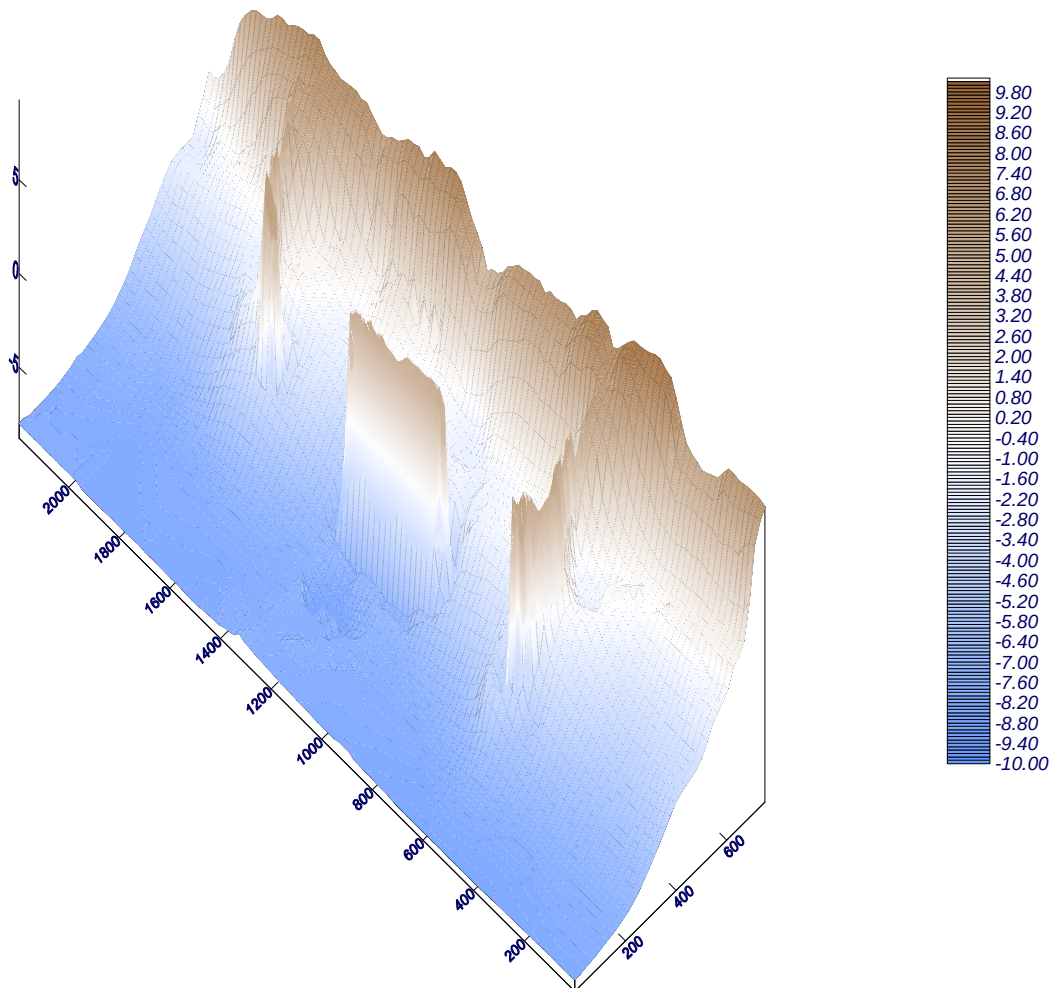


Figura 6.17 - Representação a três dimensões da batimetria com o quebramar destacado (metros ao ZH)

Neste ponto, optou-se por ilustrar duas simulações em simultâneo, de características idênticas, apenas diferindo no que diz respeito à orientação da agitação, para uma melhor contextualização da descrição e para focar melhor alguns aspectos importantes destas simulações, mais importantes e complexas que as descritas até agora no ponto anterior. As duas situações escolhidas referem-se a um nível de maré de +4,0 (ZH) metros, altura de onda de 5 metros, período de 18 segundos, e orientações de oeste e noroeste.

Tal como no subcapítulo anterior, são apresentadas inicialmente algumas representações pertencentes ao Oluca-MC. Nas figuras 6.18a) e 6.18b) estão representadas as variações espaciais das alturas de onda sobrepostas com as frentes de onda. Em ambos os casos é nítida a zona de sombra a sotamar do quebramar destacado, existindo uma rotação desta zona para a agitação de noroeste. Tal como para a situação base, o efeito dos esporões ainda é efectivo, funcionando também como meio de difracção das ondas, e provocando uma diminuição da sua altura, na zona abrigada por estes. A sotamar do quebramar destacado, as alturas de onda diminuem até níveis próximos do zero, sendo eficiente

mesmo para alturas de onda de 5 metros, conjugadas com um nível de maré de 4,0 (ZH) metros. Outro aspecto a salientar é a tendência, em ambos os casos, para o que aparenta ser uma menor eficiência do conjunto quebramar destacado-esporão, na diminuição da energia de agitação na zona mais a norte, ou seja, entre o esporão norte, e o quebramar destacado. Aí, existe uma entrada na zona protegida de agitação com maiores alturas. Entre os esporões e o quebramar destacado é notória, para ambos os casos, a acção da refacção numa primeira zona, o conjunto refacção-difracção numa zona intermédia, e na zona a sotamar o efeito isolado da difracção.

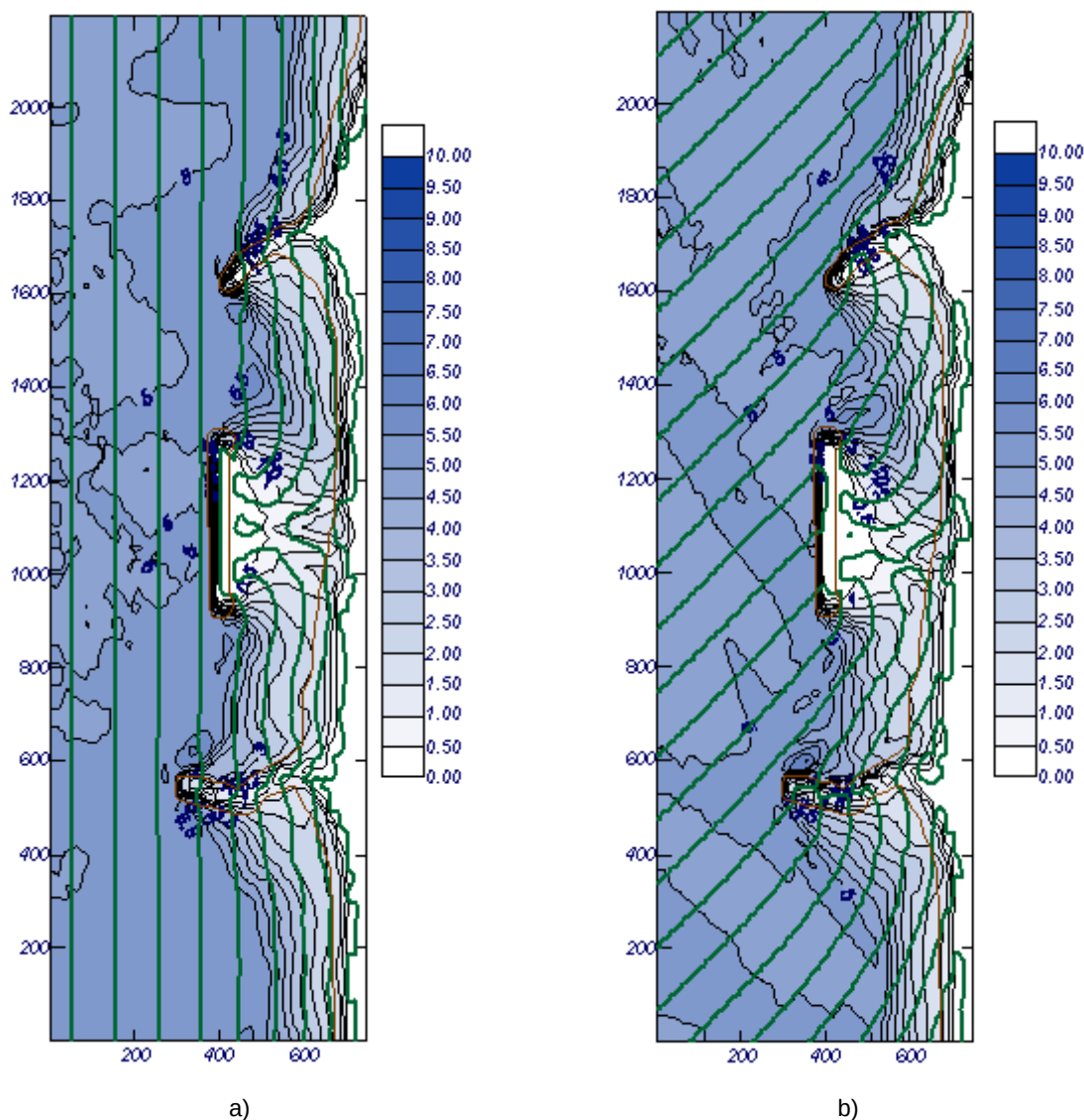


Figura 6.18 - a) Alturas de onda-frentes de onda para a orientação de agitação oeste, b) Alturas de onda-frentes de onda para a orientação da agitação de noroeste

Nas figuras 6.19a) e 6.19b), estão representadas as variações espaciais da fase, para as mesmas duas situações. Se ao largo se notam grandes diferenças devidas às diferentes orientações, na zona entre os esporões e o quebramar destacado, a situação é muito semelhante, sobressaindo mais uma vez a ideia do efeito de difracção das ondas provocado pelo quebramar destacado.

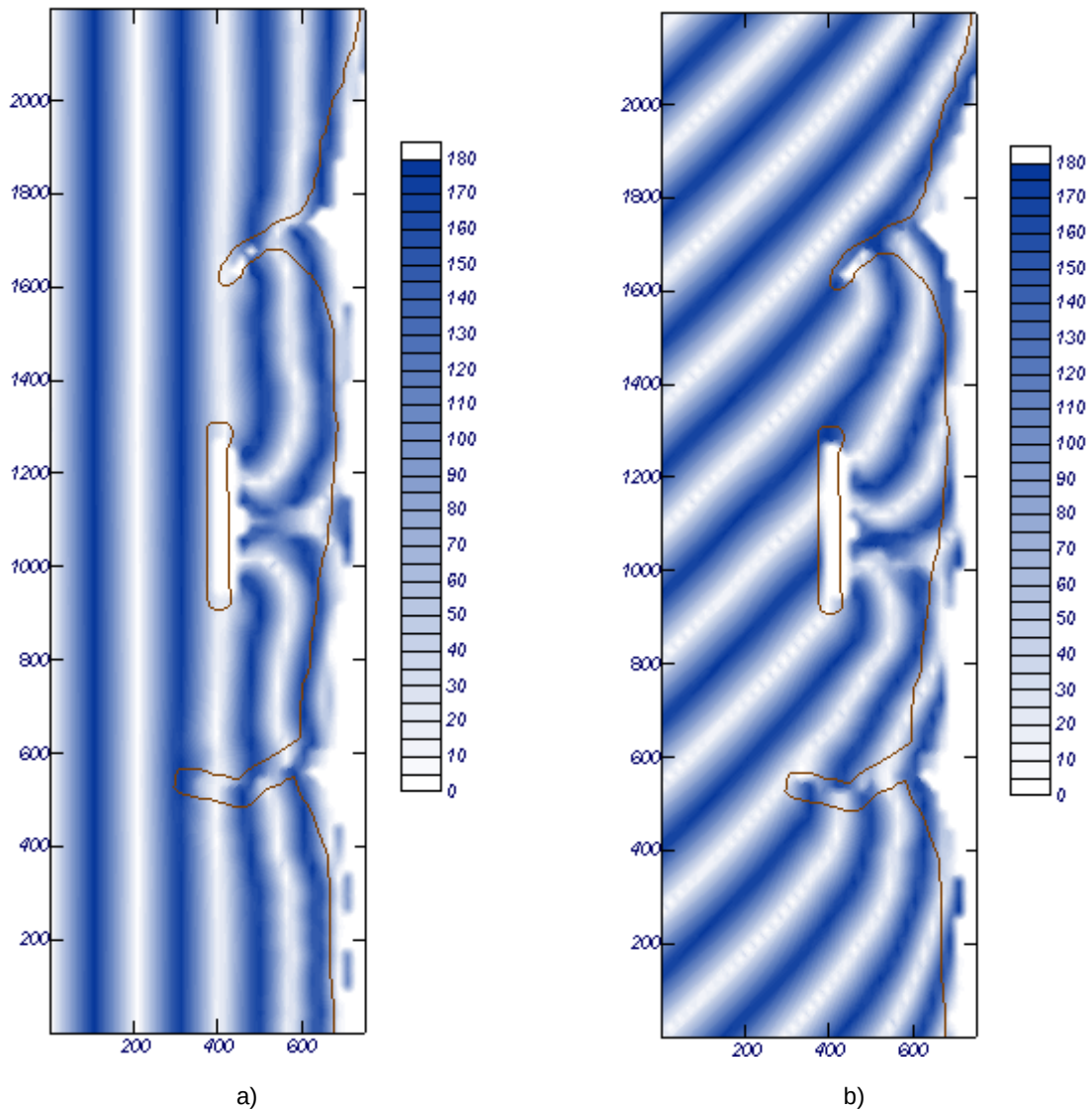


Figura 6.19 - a) Variação espacial da fase para a orientação da agitação de oeste, b) Variação espacial da fase para a orientação da agitação de noroeste

As figuras 6.20a) e 6.20b) referem-se aos gráficos dos vectores agitação e magnitude. Tal como nas representações anteriores referentes ao Oluca-MC, são de constatação clara, as zonas de sombra das três estruturas de defesa costeira, assim como a difracção das ondas provocadas por elas. Como seria de esperar, em termos de valores máximos, não existe diferença entre as duas figuras, já que apenas diferem na orientação da agitação, e o parâmetro que poderia aumentar a sua magnitude seria a altura de onda.

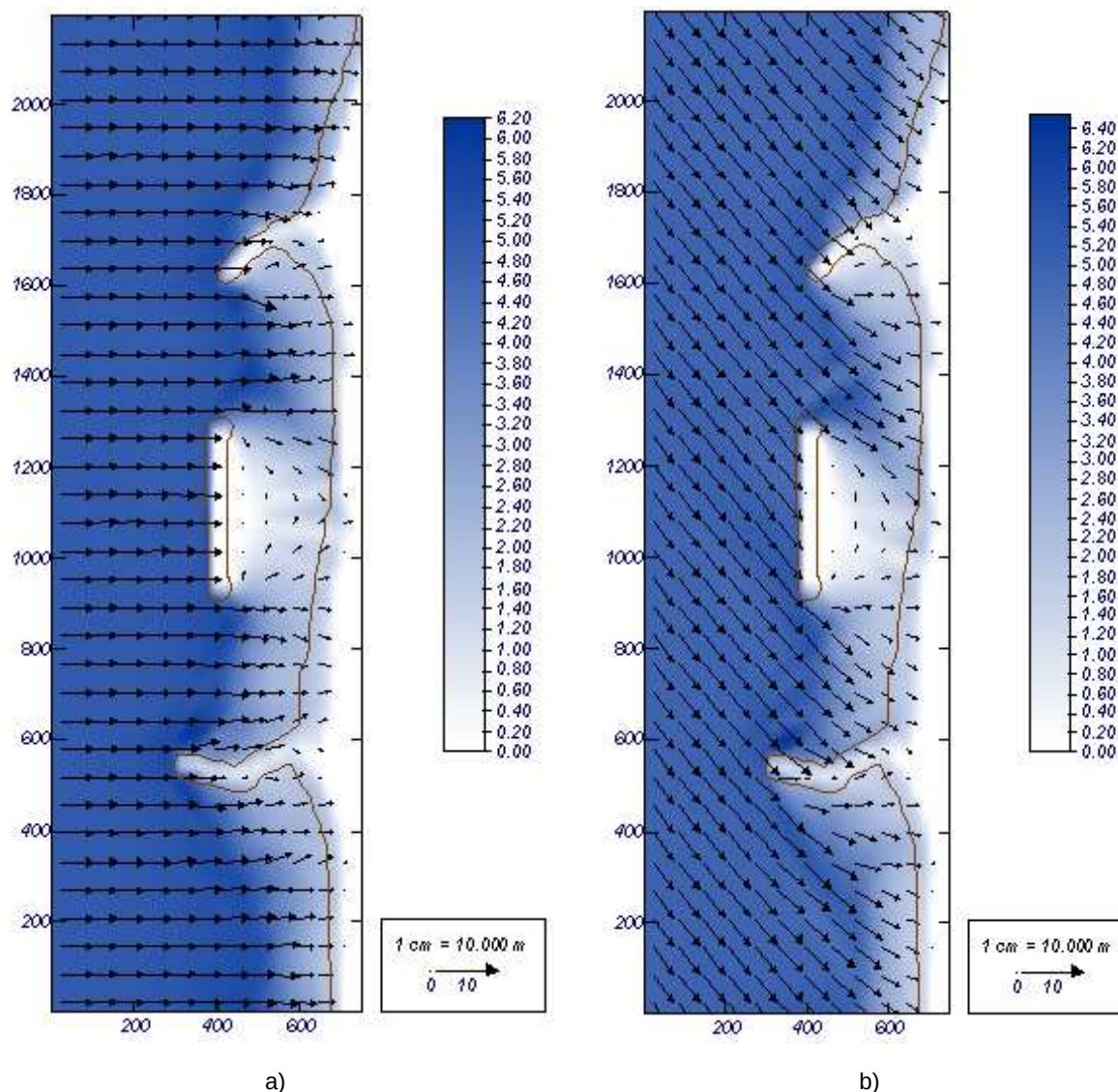


Figura 6.20 - a) Vectores agitação-magnitude para a orientação da agitação de oeste, b) Vectores agitação-magnitude para a orientação da agitação de noroeste

Nas figuras 6.21a) e 6.21b), estão representados os vectores corrente-magnitude, referentes ao modelo Copla-MC. Numa primeira análise, poderá dizer-se que com a introdução do quebramar destacado, a complexidade das correntes aumentou. Se a norte do esporão norte, e a sul do esporão sul, se pode concluir que a situação é idêntica com ou sem quebramar destacado, na zona entre estes, os fenómenos relacionados com as correntes mudaram. Para o caso da agitação perpendicular ao quebramar destacado, ou seja, de oeste, parece existir uma grande zona de recirculação, rodeando o quebramar, existindo duas menores zonas de recirculação junto aos esporões, especialmente no esporão norte. Existe também uma faixa de conflito nesta área, no encontro das duas zonas de recirculação. Para o caso da figura 6.21b), mantém-se a zona de recirculação junto do esporão norte, sendo mais nítido um fenómeno semelhante junto ao esporão sul, e surgindo melhor definidas pequenas recirculações junto às cabeças do quebramar destacado.

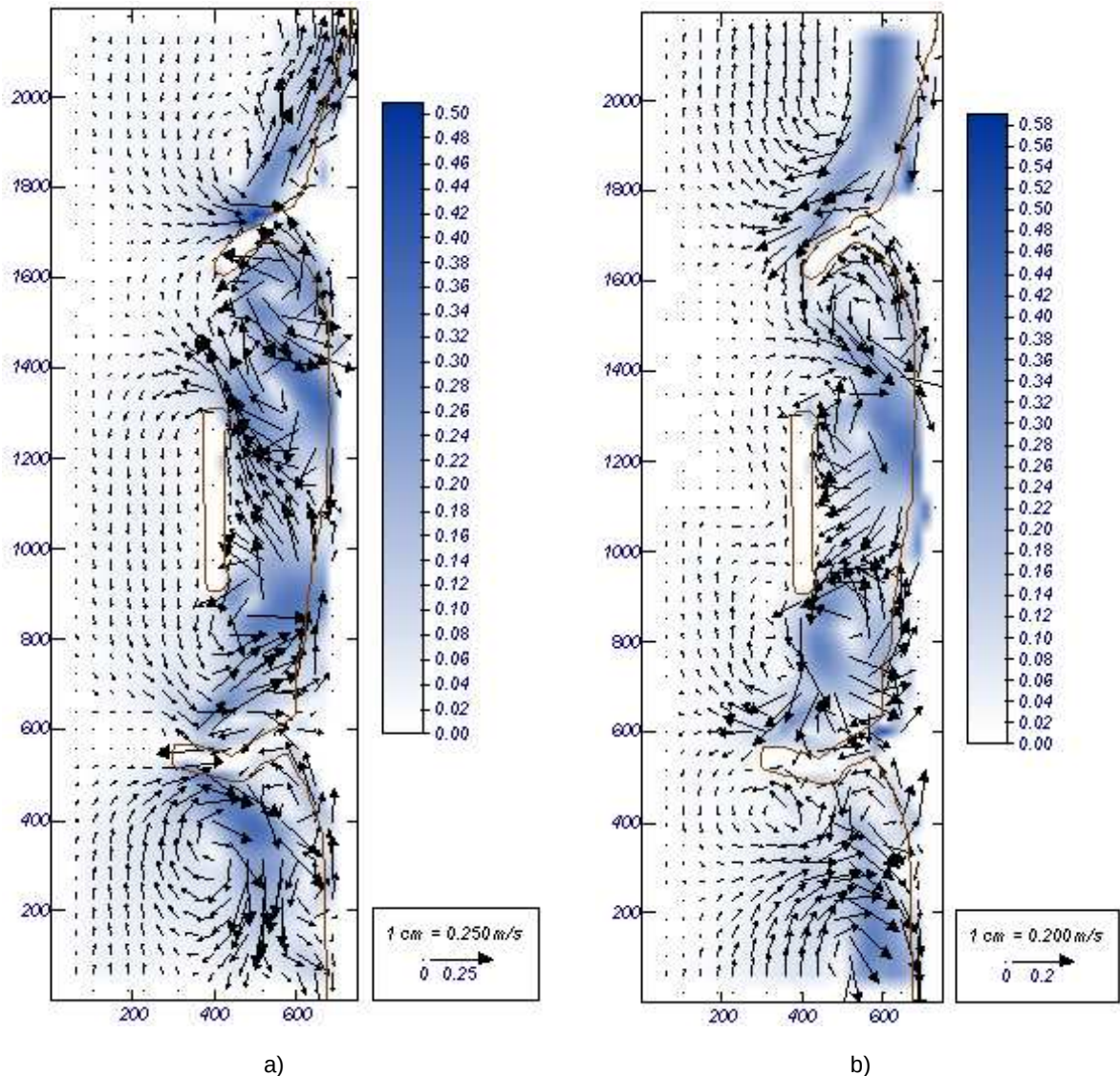


Figura 6.21 - a) Vectores corrente-magnitude para a orientação da agitação oeste e b) Vectores corrente-magnitude para a orientação da agitação de noroeste

A aplicação do modelo Eros-MC, origina gráficos de vectores transporte potencial-magnitude, figura 6.22a) e 6.22b), verificando-se mais uma vez grandes diferenças, quando comparados com, por exemplo, com os das figura 6.8a) e 6.15a). O corredor quase paralelo à costa de maior potencial de transporte, especialmente no caso de agitação noroeste, é anulado pela presença do quebramar destacado. Existe uma zona central agora mais protegida de potenciais erosões, zona essa que existia anteriormente onde se verificavam os maiores valores do transporte potencial. É no entanto importante referir que apesar das zonas de maior magnitude terem diminuído e se terem afastado da linha de costa, existe uma zona, para ambas as orientações, ainda muito vulnerável. Esta zona entre o esporão norte e o quebramar destacado poderá tornar-se mais instável, visto que se se continuar a assistir a uma diminuição dos sedimentos transportados ao longo da costa, esta zona poderá começar a recuar. Um dado interessante que se retira da análise destas duas situações, é a inversão do local de entrada dos vectores de transporte potencial, de uma situação em relação a outra. Por outras palavras, se no caso de agitação de oeste a zona de recirculação tem entrada pela cabeça sul do quebramar destacado e saída

pela cabeça norte, no caso da agitação de noroeste, mantém-se algo semelhante com a situação sem quebramar destacado, ou seja, a presença de uma faixa de transporte maior ao longo da costa de norte para sul de maior transporte potencial, apenas interrompida pela zona de sombra provocada pelo quebramar destacado.

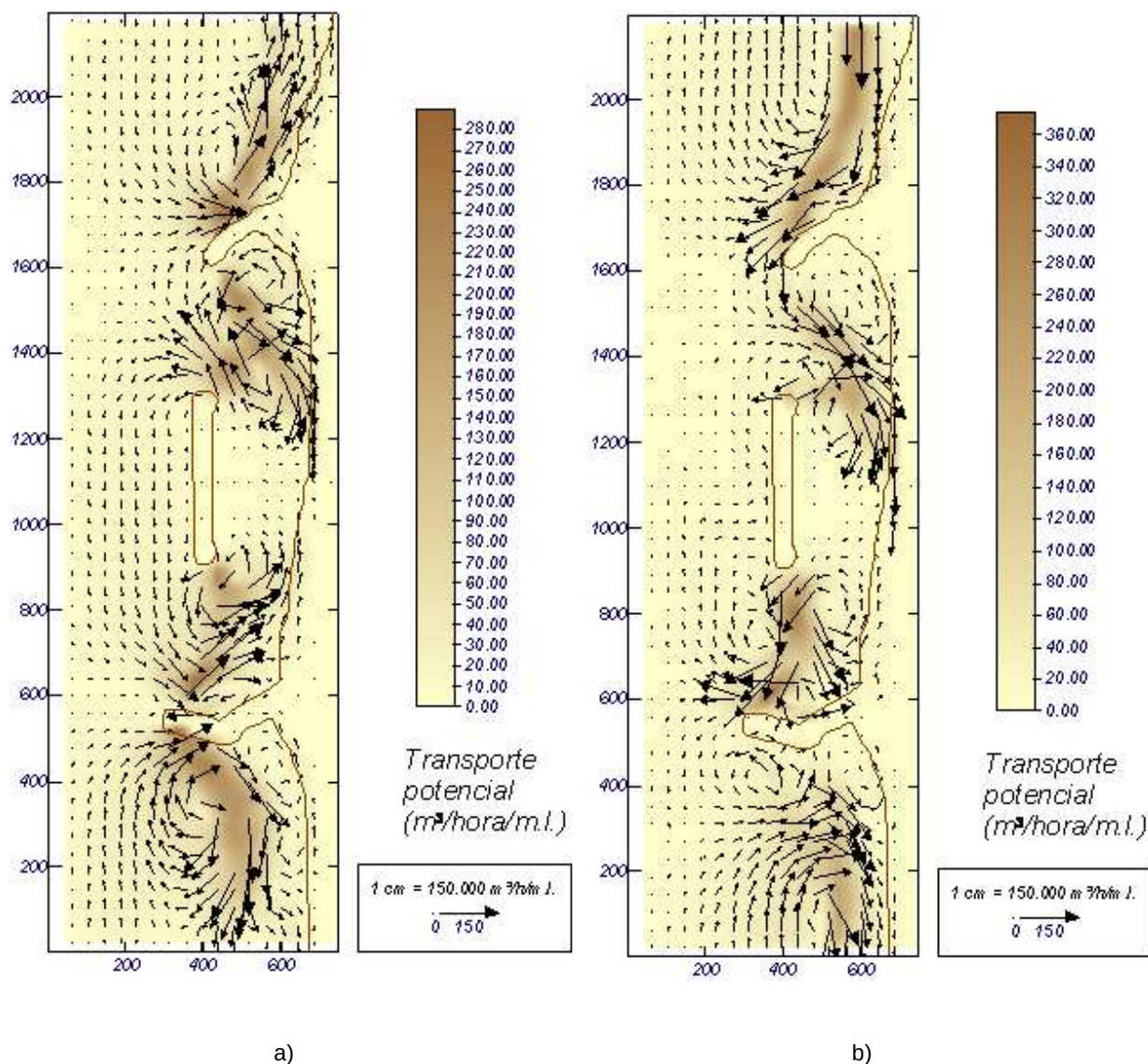


Figura 6.22 - a) Vectores transporte potencial-magnitude para orientação da agitação oeste e b) Vectores transporte potencial-magnitude para orientação da agitação noroeste

As figuras 6.23a) e 6.23b) e 6.24 dizem respeito a outras simulações efectuadas, mas que por terem características e resultados interessantes, foram também adicionadas a este capítulo para uma análise isolada. A figura 6.23a) referente a uma simulação de características semelhantes às já discutidas, tendo como diferença um nível de maré distinto (0 (ZH) metros), apresenta um fenómeno interessante, na medida em que a área protegida pelas três estruturas de defesa, se mantém fora da zona de maior magnitude. É novamente criada uma faixa de maior magnitude, mas que em vez de seguir a linha de

costa, passa ao largo desta, por fora do quebramar destacado, tendo apenas uma perturbação nessa zona e atingindo maiores valores de transporte potencial nas cabeças do quebramar destacado.

Já no caso da figura 6.23b), também para um nível de maré de 0 (ZH) metros, mas com uma altura de onda de 2 metros, existe novamente uma entrada significativa de agitação na zona protegida, ainda que com valores máximos muito inferiores aos das simulações com ondas de 5 metros de altura. Pode concluir-se, tal como era de esperar, que o parâmetro altura de onda é o que mais influência os valores do transporte potencial.

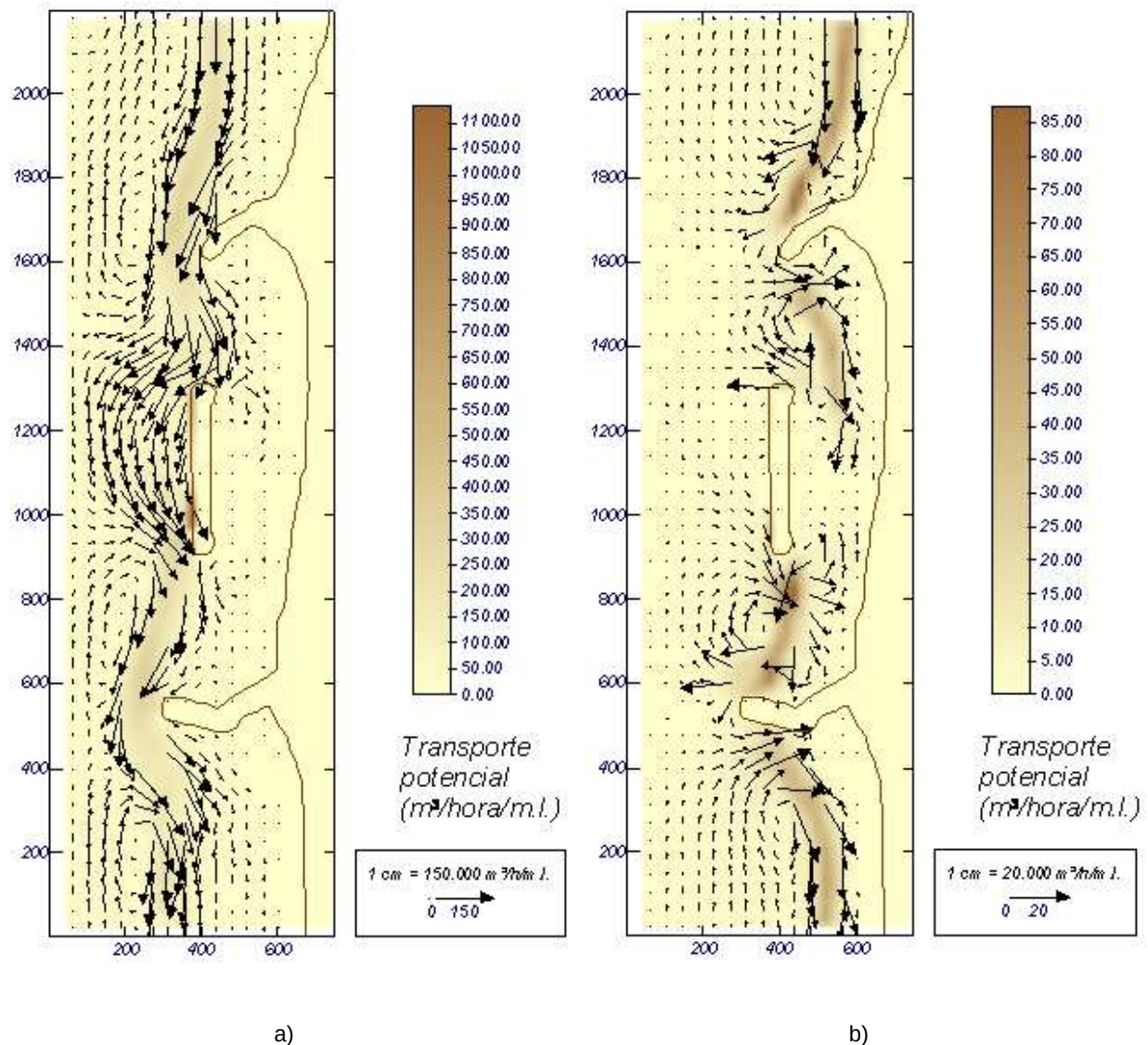


Figura 6.23 - a) Vectores transporte potencial-magnitude para a situação de nível de maré 0 (ZH) metros e orientação da agitação noroeste, b) Vectores transporte potencial-magnitude para situação de maré 0 (ZH) metros, altura de onda 2 metros e orientação de noroeste

Outro exemplo interessante, figura 6.24, diz respeito ao caso de agitação de oeste, e uma altura de onda de 5 metros, maré 0 (ZH) metros e período de 18 segundos. Neste caso ocorrem duas zonas de recirculação em cada uma das cabeças dos esporões, afectando também as cabeças do quebramar

destacado. Mais uma vez, a agitação tem poucos efeitos na zona abrigada para níveis de maré baixos, apesar de se tratar de uma altura de onda de 5 metros. Esta figura, juntamente com as anteriores, poderá levar a concluir que, segundo o modelo, a agitação com alturas de onda de 5 metros, ou seja, eventos de agitação de grande energia, são claramente minimizados pelas estruturas de defesa costeira implantadas para esta situação hipotética da construção de um quebramar destacado.

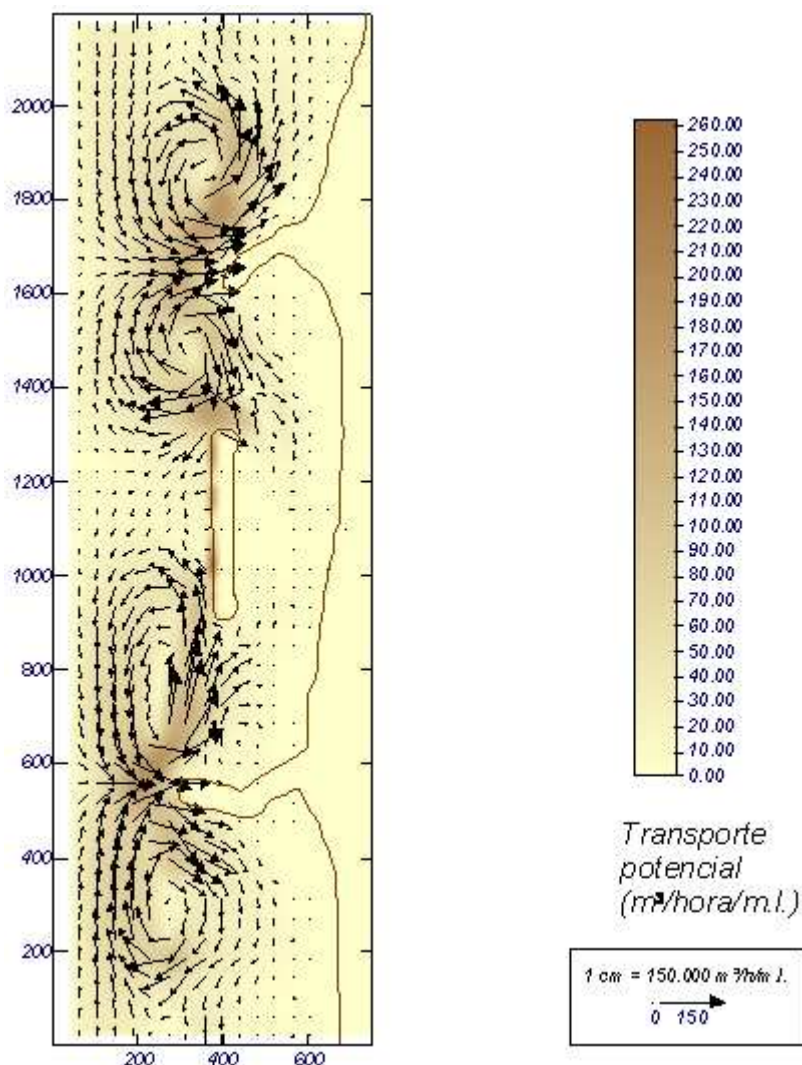


Figura 6.24 - Vectors transporte potencial-magnitude para o caso de agitação de oeste, altura de onda 5 metros, maré 0 (ZH) metros e período de 18 segundos

Como já tinha sido observado para as simulações com a batimetria-base, nos casos de maré +4,0 (ZH) metros, a alteração da costa, só se processa para as batimétricas mais junto da linha de costa. Isso pode ser observado se se comparar as figuras 6.25a) e 6.25b) com a figura 6.26 referente a uma situação de nível de maré 0 (ZH) metros. Contudo existe uma relação entre as figuras 6.22a) e 6.25a) e 6.22b) e 6.25b). No primeiro conjunto a relação é óbvia especialmente para a zona de sotamar do esporão sul. O grande transporte potencial demonstrado pela figura 6.22a) nesta zona, é confirmado em 6.25a) com uma grande alteração das batimétricas. É de salientar uma interessante acumulação de sedimentos a barlar do quebramar destacado. Para 6.25b) também se verifica uma maior alteração das

batimétricas nas zonas em que em 6.22b) se nota uma maior magnitude do transporte potencial, a sotamar do esporão norte, e a barlamar do esporão sul.

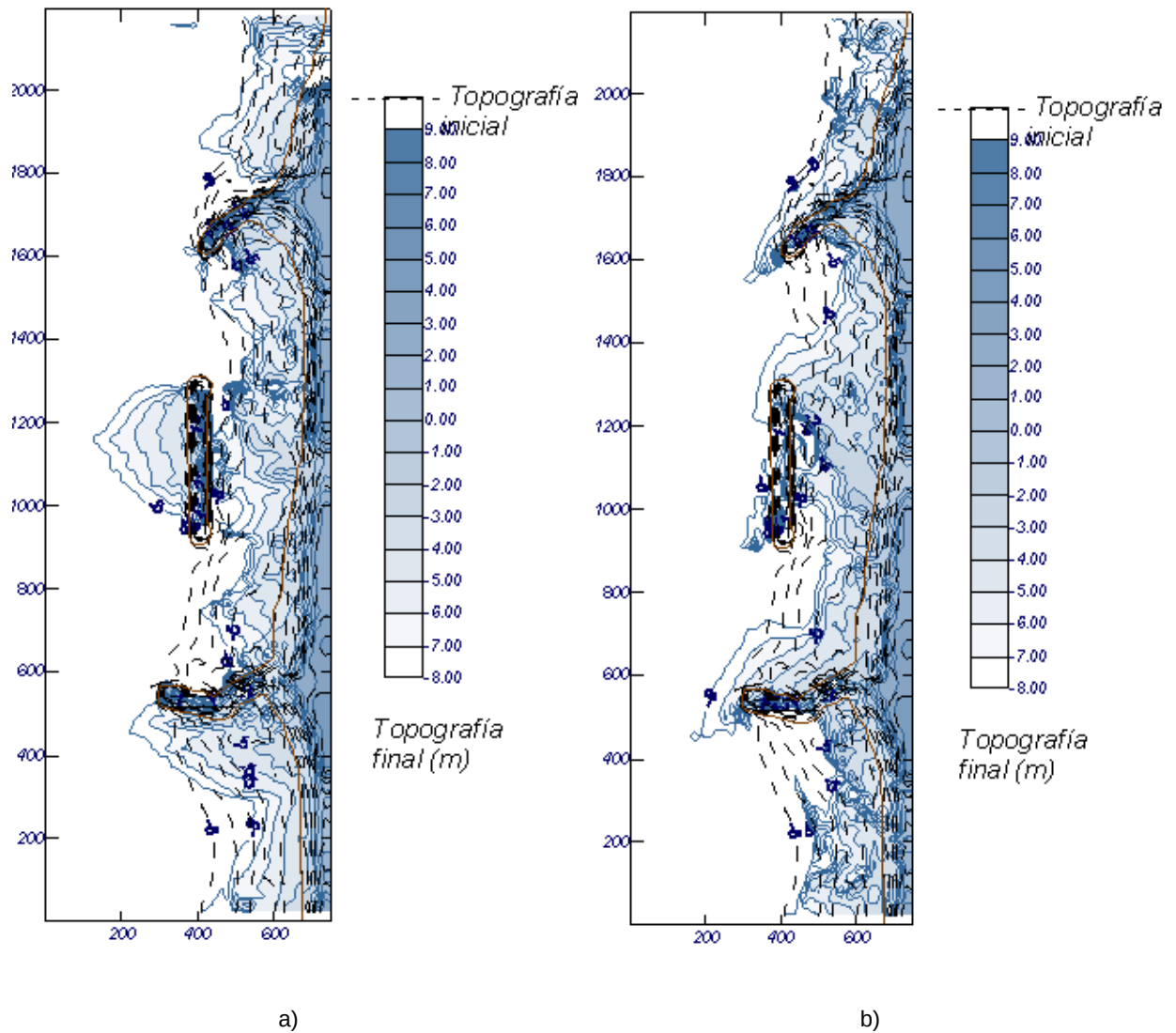


Figura 6.25 - a) Variação da batimetria oeste, b) Variação da batimetria noroeste

Apesar dos resultados parecerem mais acertados para o caso da figura 6.26 quando comparados com a figura 6.25a) e 6.25b), a realidade é que também se poderá apresentar algumas críticas, pois num tão curto espaço de tempo, parece pouco provável tamanha alteração nas batimétricas. Como se verá mais à frente na análise às simulações com agitação irregular, os resultados alcançados são mais próximos do que poderá acontecer na realidade.

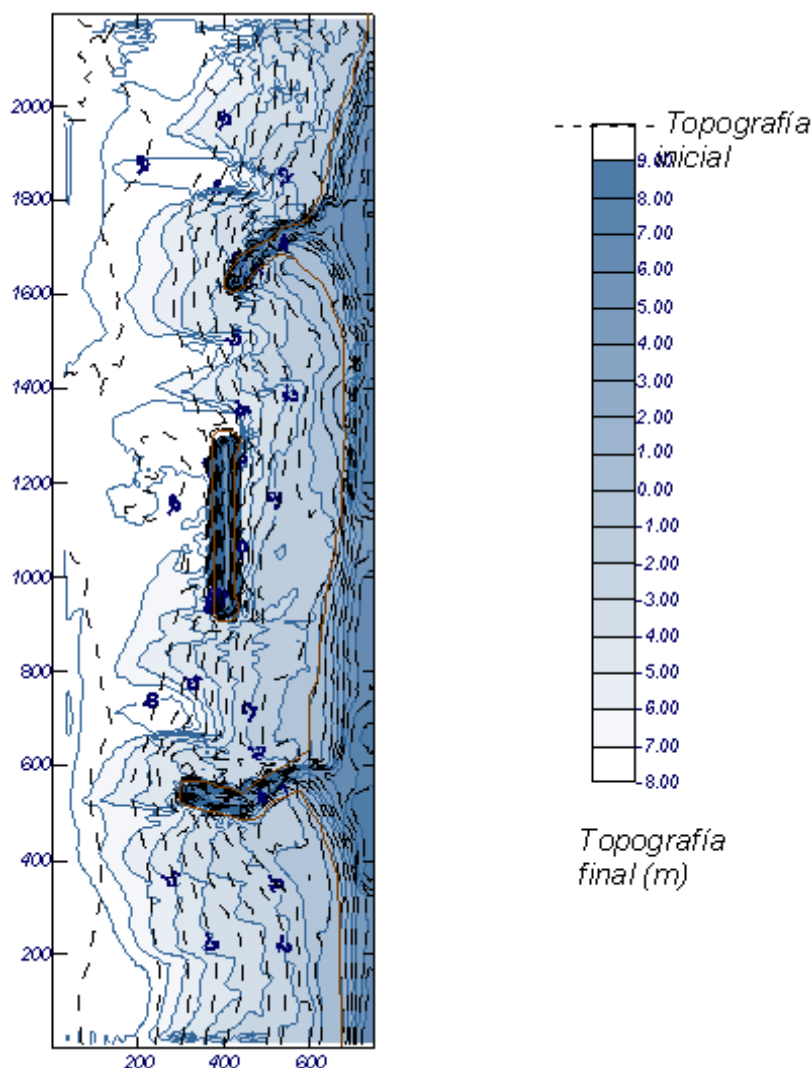


Figura 6.26 - Variação da batimetria caso de maré 0 (ZH) metros, 5 metros de altura de onda, período de 12 segundos e orientação da agitação oeste

Com a figura 6.26 termina a análise das simulações referentes a um nível de maré de +4,0 (ZH) metros, altura de onda de 5 metros, período de 18 segundos, e orientações de oeste e noroeste, e de algumas representações extra que se consideraram importantes. Assim, e começando pelas representações do Oluca-MC, irá ser efectuado um comentário conjunto e final a todas as 16 simulações referentes a este grupo de agitação regular para a batimetria-base com quebramar destacado.

Em todos os gráficos referentes a variação espacial de alturas de onda-frentes de onda destas simulações, e quando comparados com as simulações sobre a batimetria-base, existe uma grande diferença em termos de forma, e não em termos de valores máximos e mínimos, que o quebramar destacado confere tanto as alturas de onda como às frentes de onda. Se nas primeiras é clara a zona de sombra causada, resultando numa grande diminuição das alturas de onda na zona de sotamar do quebramar, nas frentes de onda é também nítida a alteração devido à refração numa primeira fase, à refração-difracção numa segunda fase, e por fim, já na zona de sombra, o efeito da difração das ondas isolado, tudo isto junto às cabeças do quebramar destacado.

Tal como seria de esperar, um aumento do período da onda promove um afastamento das frentes de onda, assim como um alargamento das zonas de igual altura de onda. Um aumento do nível de maré também provoca um afastamento das frentes de onda e uma translação das zonas de igual altura de onda para zonas de cotas superiores, sendo claro este efeito na zona da linha de costa. A altura de onda para além da natural subida dos valores máximos para 5 metros, provoca uma diferença significativa na distribuição das zonas de igual altura de onda, sendo esta diferença especialmente notada na rápida descida dos valores de altura de onda para as zonas entre os esporões e o quebramar destacado.

Para os gráficos relacionados com a fase, a análise é algo semelhante ao que se verificou para as frentes de onda, sendo mais uma vez reforçado o efeito de difracção das ondas por parte do quebramar destacado.

Finalizando a análise do Oluca-MC com os vectores agitação-magnitude, é possível observar, ainda mais claramente, a zona de sombra com uma forma próxima de um triângulo a sotamar do quebramar destacado, constatando-se uma quase anulação dos vectores agitação e obviamente da magnitude, o que confirma o efeito de diminuição ou até a quase anulação da energia das ondas a sotamar da estrutura. Este efeito é conseguido independentemente do valor da altura de onda testada, do período, maré e orientação da agitação. O lado a barlar do esporão sul poderá ser considerado como o local onde a agitação chega com maiores alturas, para as duas hipóteses de orientação, havendo a norte, entre o quebramar destacado e o esporão norte, uma translação de norte para sul da zona de maior magnitude quando se aplica uma agitação de noroeste ao modelo.

Os outputs dos vectores corrente-magnitude, referentes ao Copla-MC, tiveram uma grande alteração com a introdução do quebramar destacado, e mesmo entre as simulações que agora vão ser analisadas existe uma grande variabilidade de caso para caso, como já se viu, comparando as figuras 6.21a) e 6.21b). Na comparação com os casos sobre a batimetria-base, o aspecto mais marcante é sem dúvida a deslocação do ponto de maior velocidade de correntes de barlar do esporão sul a de sotamar do esporão norte, especialmente para simulações com orientação de noroeste. Isso demonstra que o quebramar destacado protege efectivamente uma zona da linha de costa entre os esporões, mas não parece resolver os problemas em toda a sua extensão, carecendo portanto de optimização, podendo transportar a zona com maiores problemas para norte. Se, sem o quebramar destacado era notória a diferença entre as situações de noroeste e oeste para a distribuição de zonas de recirculação, tal agora já não se verifica acontece assim, sobretudo para a zona de maior interesse, que é a de sotamar do quebramar destacado.

Em termos da sensibilidade dos parâmetros em jogo, o período volta a não apresentar peso significativo em qualquer alteração, quer da forma das correntes, quer na sua velocidade. O parâmetro altura de onda para além de, com o seu aumento aumentarem também as velocidades, apenas altera significativamente a forma das zonas de recirculação para simulações de nível de maré igual a 0 (ZH) metros, de orientação oeste, pois são criadas duas grandes zonas de recirculação em cada cabeça dos esporões, para o caso de ondas de 5 metros e não para as de 2 metros de altura. O nível de maré, mais uma vez, provoca essencialmente uma translação das zonas de maior magnitude de oeste para este, ou seja, na direcção da linha de costa. Os valores máximos das velocidades de correntes são vistos essencialmente em simulações com período de onda de 12 segundos e de altura de 5 metros e situam-se próximo dos 0,7 m/s. Para simulações com altura de onda de 2 metros os valores máximos são da ordem dos 0,5 m/s. É de salientar um ligeiro aumento deste valor para as simulações com quebramar destacado em relação às simulações com a batimetria-base, de cerca de 0,2 m/s.

Analizando os gráficos referentes ao Eros-MC, mais propriamente os vectores de transporte potencial-magnitude, verifica-se que existe também uma grande variabilidade de resultados, como se observou

para o conjunto anterior dos vectores corrente, confirmada pelas figuras já apresentadas 6.22a), 6.22b), 6.23a), 6.23b) e 6.24. É de referir desde já que as ondas de maior período, assim como as ondas de maior altura, promovem o aumento dos valores máximos de transporte potencial, não se notando para o período analisado qualquer outra alteração em termos de localização ou forma das zonas de recirculação. Para 4 simulações que se referem ao nível de maré de 0 (ZH) metros e alturas de onda de 5 metros, as zonas de maior magnitude, ou seja, de maior transporte potencial encontram-se todas a barlamar do quebramar destacado, casos como os de 6.23a) e 6.24. Este aspecto parece ter algum interesse, visto que a zona mais sensível está assim menos sujeita a modificações nos volumes sedimentares. No entanto, para o nível de maré de +4,0 (ZH) metros, as quatro simulações correspondentes já apresentam grandes magnitudes essencialmente na zona norte próxima do esporão norte, entre este e o quebramar destacado. A opção pela orientação oeste ou noroeste não provoca grandes diferenças nem nos valores máximos de magnitude nem onde estes ocorrem, sendo aliás exemplo disso as figuras 6.22a)A e 6.22b). Como valores máximos para a magnitude são encontrados valores entre 150 e 200m³/h/m.l. para as simulações com alturas de onda de 5 metros e período de 18 segundos. Para o caso de alturas de onda de 2 metros, os valores máximos não ultrapassam os 80 m³/h/m.l..

Finalmente para os gráficos referentes à variação da batimetria, é interessante referir que existe novamente uma diferença óbvia na reacção do modelo a simulações com 0 (ZH) metros ou 4 (ZH) metros de nível de maré. Para o primeiro caso o programa considera todas as batimétricas existentes, enquanto que para o caso de +4,0 (ZH) metros apenas as batimétricas mais próximas da linha de costa são consideradas para as modificações. Este aspecto poderá estar relacionado com a profundidade de fecho considerada pelo *software*, já comentada para as simulações com batimetria-base. São notórios alguns problemas em simular períodos de 12 segundos com agitação de noroeste, tanto para alturas de onda de 5 metros como para de 2 metros como para os dois níveis de maré. Estas 4 simulações apresentam resultados inválidos, com indefinição em algumas zonas. Na generalidade das simulações com altura de onda de 2 metros, as alterações das batimétricas são mínimas, sendo que as apenas se verificam geralmente alterações nas zonas junto aos esporões. Para as simulações de altura de onda de 5 metros, e maré de 0 (ZH) metros, os resultados também não são satisfatórios, visto que as alterações são muito grandes para um evento tão curto e também com formas pouco prováveis. Já nos casos de maré +4,0 (ZH) metros, apesar das alterações também serem algo exageradas para um intervalo tão curto, é possível ver tendências com alguma lógica visto que as alterações têm a forma de um potencial tómbolo ou saliência, o que poderá deixar em aberto que repetidos eventos poderão acumular sedimentos numa destas duas formas.

Terminada esta análise geral para as simulações de agitação regular, segue-se uma análise dos efeitos do quebramar destacado, quando solicitado por agitação irregular. Para estas simulações foram usadas malhas com as mesmas dimensões e mesmo ponto de origem das malhas usadas para a agitação irregular, mas agora com espaçamentos entre colunas horizontais de 15,57 metros (142 espaços) e 15,32 metros para verticais (50 espaços) para o período de pico de 12 segundos, e para o período de pico de 18 segundos foi usada uma malha com linhas horizontais espaçadas de 25,53 metros (87 espaços), e linhas verticais afastadas de 25,89 metros (3 espaços).

A simulação que irá ser apresentada diz respeito a uma altura de onda significativa de 5 metros, período de pico de 12 segundos, amplitude de maré de 4,0 metros e uma orientação de agitação principal de N65°W com dispersão de +/- 25°. Esta simulação foi efectuada com as mesmas características da realizada com a batimetria-base com agitação irregular, para uma mais fácil comparação.

Como primeira representação com agitação irregular, surge na figura 6.27, a variação espacial das alturas de onda significativas. Como já foi visto nos casos de agitação regular, é clara a influência do quebramar destacado na distribuição das alturas de onda significativas. Tal como para a simulação base, os resultados para este parâmetro surgem mais uniformes e com melhores resultados, sem zonas de configuração estranha. Se compararmos esta figura com as restantes 3 simulações do mesmo tipo, como aliás já foi visto para a batimetria-base, para além das diferenças óbvias para com os resultados referentes a alturas de onda de 2 metros, o período de pico de 18 segundos promove um estreitamento das faixas referentes às alturas de onda significativas, sobretudo para a faixa entre os 4,5 e 4 metros.

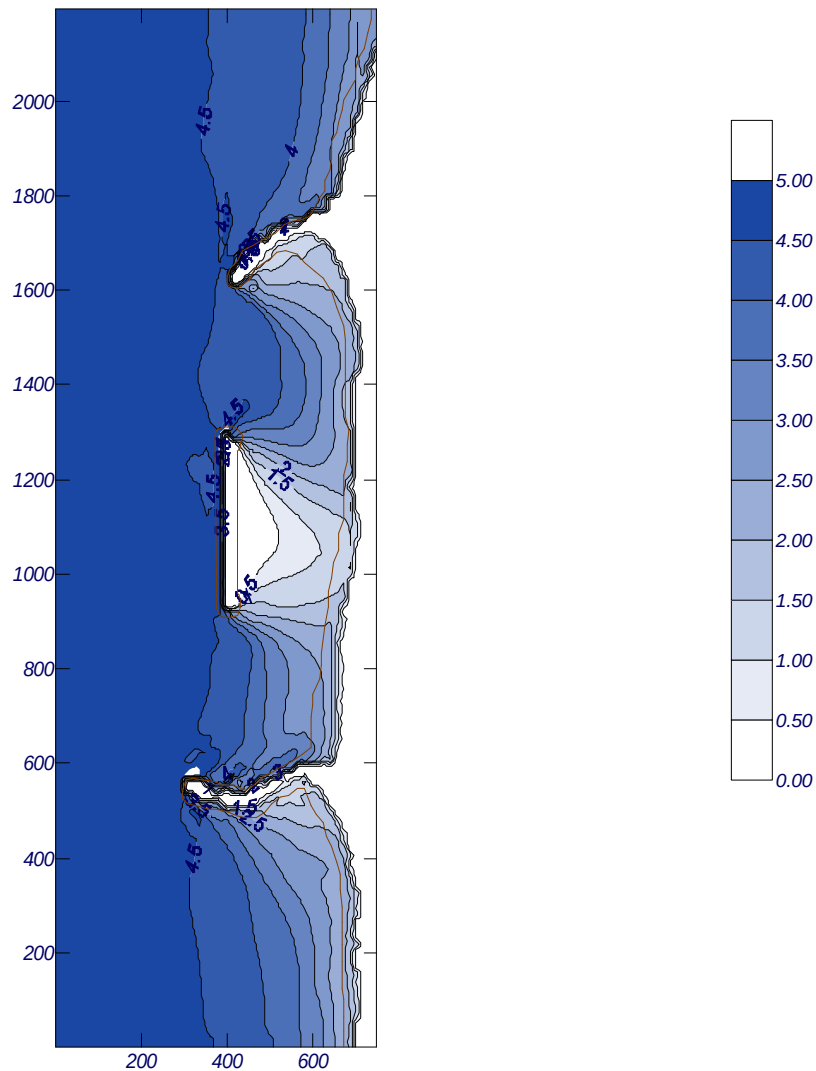


Figura 6.27 - Variação espacial das alturas de onda significativas

Em relação à figura 6.28a), referente aos vectores agitação-magnitude, não há muito a acrescentar, visto que os resultados são semelhantes aos de agitação regular e também aos obtidos utilizando a batimetria-base, salvo as diferenças que seriam de esperar pela implantação do quebramar destacado que provoca uma clara zona de sombra e de diminuição da energia de agitação.

Já na figura 6.28b), é clara a melhoria da definição das zonas de recirculação, quando comparadas com as resultantes de agitação regular, talvez não só pela acção das várias alturas de onda e frequências do espectro usado, mas essencialmente pelo intervalo de orientações possíveis utilizado. Como se pode ver, mantêm-se as pequenas recirculações nas cabeças do quebramar destacado, a barlar do esporão norte e a sotamar do esporão sul, e ficam mais notórias ainda, as duas grandes zonas de recirculação mais a norte, uma a sotamar do esporão norte, outra já perto de sotamar do quebramar destacado (esta com as maiores velocidades), e também uma terceira mais a sul junto a outra cabeça do quebramar mas do lado de sotamar deste. Os valores máximos para este caso aproximam-se de 0,40 m/s, enquanto que para os restantes casos os valores máximos são inferiores mas próximos de 0,30 m/s, para alturas de onda significativas de 2 metros e de 0,35 m/s para o outro caso de altura de onda significativa de 5 metros.

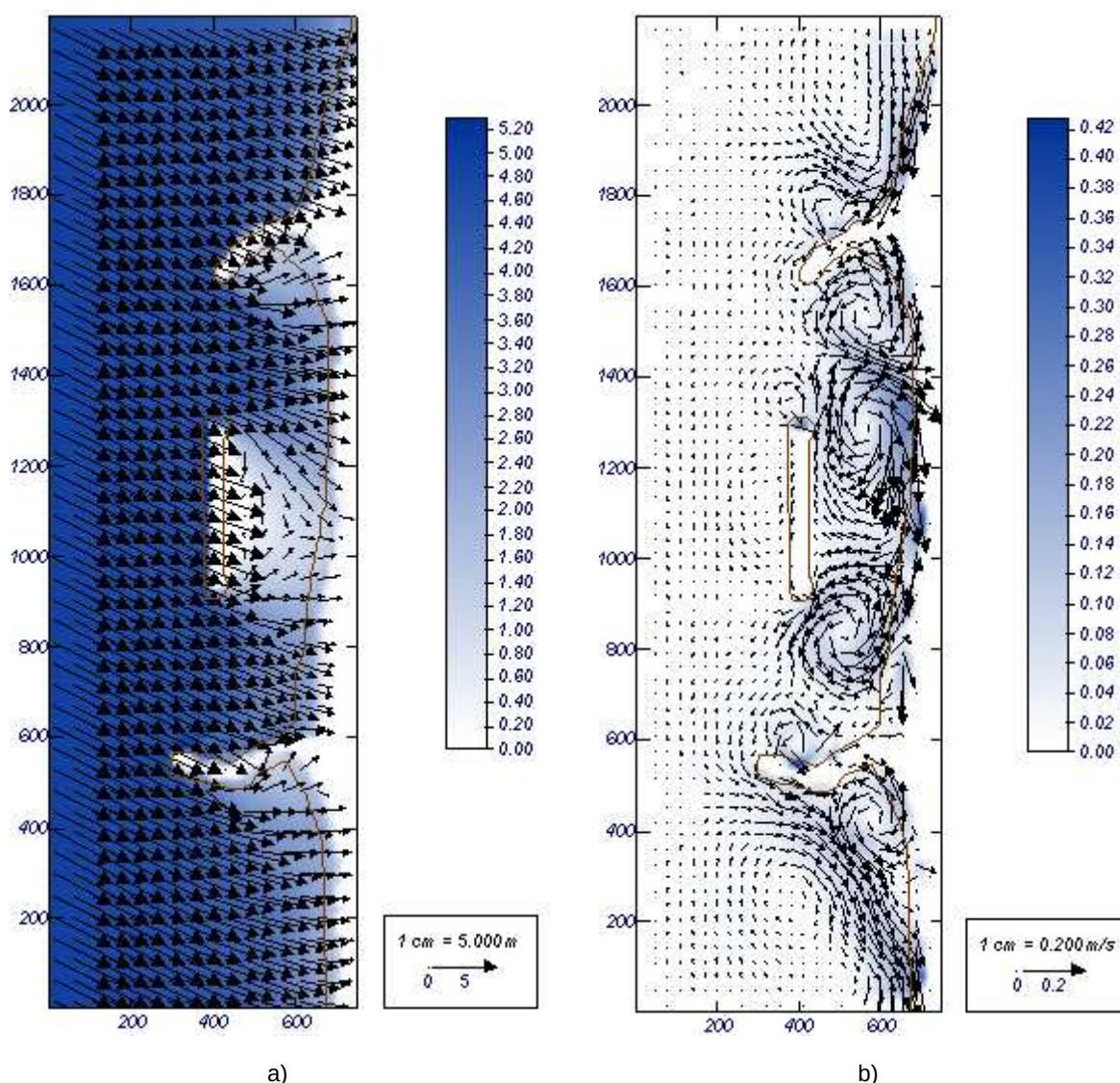


Figura 6.28 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Vectores corrente-magnitude

É interessante verificar que, a alteração do período de pico, origina resultados bastante díspares. Nessa situação, que está representada no anexo B e com período de pico de 18 segundos, as zonas onde existem maiores velocidades estão situadas a barlar do quebramar destacado e a também a barlar dos dois esporões, estando a zona central menos sujeita a fortes correntes, como era o caso da figura 6.28b).

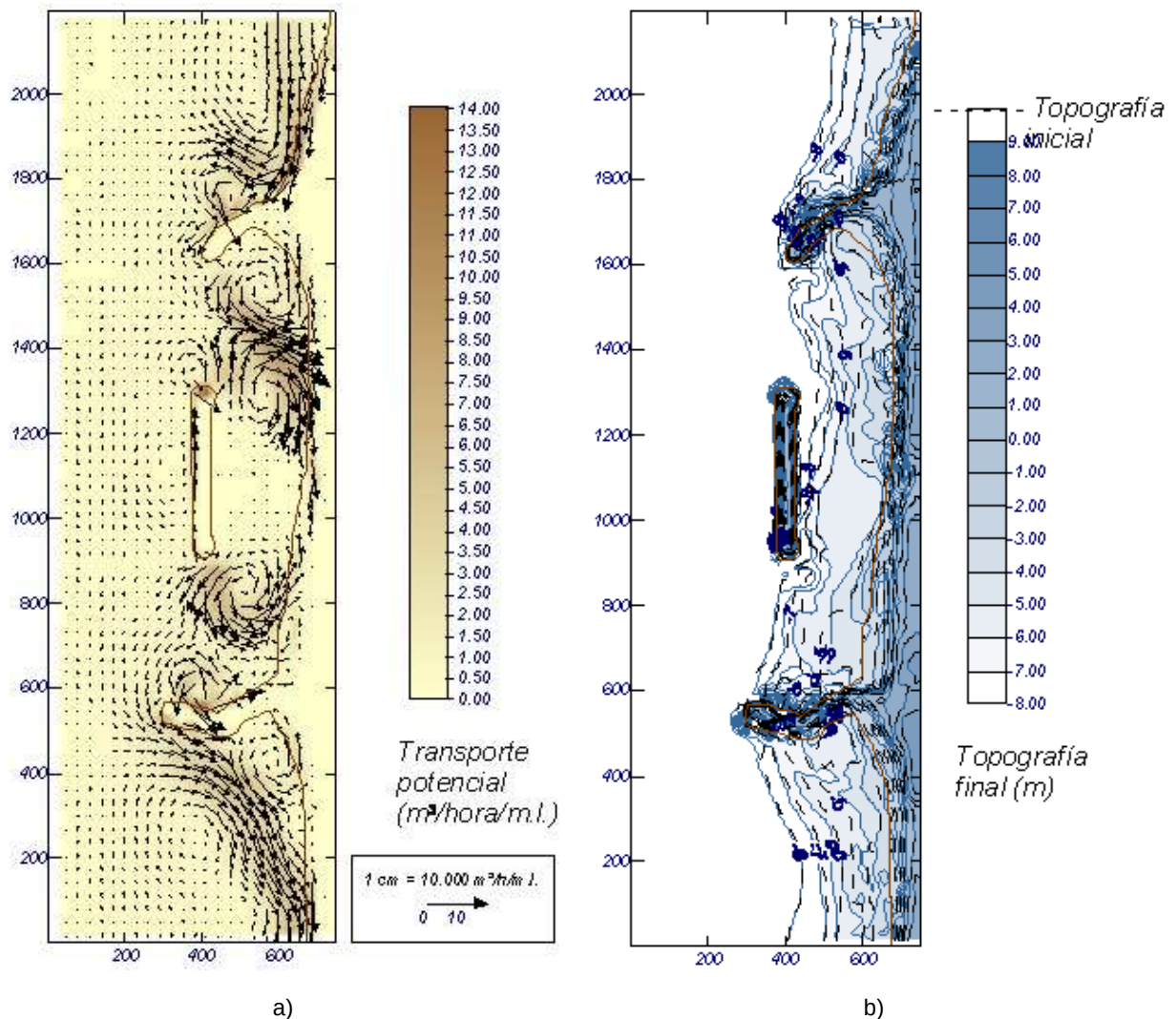


Figura 6.29 - a) Vectors transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria

A figura 6.29a) que diz respeito aos vectors transporte potencial e à sua magnitude, mostra uma grande diferença de valores máximos entre as simulações de agitação irregular e as de agitação regular. Este facto já assinalado para as simulações com a batimetria-base é mais uma vez confirmado, devendo-se, muito provavelmente ao facto de na agitação regular todas as ondas serem de 5 metros de altura e de frequência fixa, e de neste caso os valores variarem e atenuarem os efeitos do transporte potencial.

Outro aspecto decisivo é a variabilidade da orientação da agitação que poderá também contribuir para uma diminuição tão notória, visto que os valores máximos de agitação regular são da ordem dos 150-

200 m³/h/m.l. e de nos casos de agitação irregular não ultrapassarem os 40 m³/h/m.l.. Contudo, a localização das zonas de recirculação mais intensas acontece nos mesmos locais que as observadas para as simulações de agitação regular de noroeste com alturas de onda de 5 metros e nível de maré de +4,0 (ZH) metros.

Fazendo agora uma análise conjunta com as restantes simulações de agitação irregular, e tal como para as correntes, o parâmetro período de pico influencia de forma decisiva os locais de maior transporte potencial. Mais uma vez, se só se alterar este parâmetro, os locais de maior magnitude passam a ser a barlamar do quebramar destacado, situação muito diferente da registada na figura 6.29a). Para as simulações com altura de onda significativa de 2 metros, a distribuição das zonas de recirculação principais mantém-se, tendo menor magnitude. Como valor máximo do transporte potencial, estas simulações apresentam valores da ordem dos 10 m³/h/m.l..

Finalmente, a figura 6.29b), referente à variação da batimetria, apresenta pouca variação nas batimétricas, como já tinha sido notado para as simulações com a batimetria-base com agitação irregular. Este facto está relacionado com os baixos valores que estas simulações apresentam para o transporte potencial já discutidos anteriormente. Nos exemplos com altura de onda significativa de 2 metros, as alterações poderão ser mesmo consideradas nulas, já que as linhas a traço interrompido aparecem sobrepostas às linhas a cheio. Mais uma vez o modelo parece não ter correspondido bem à conjugação de período de pico 18 segundos e altura de onda significativa de 5 metros pois apresentou algumas zonas sem significado.

6.2.3. SIMULAÇÕES COM QUEBRAMAR DESTACADO PARA EVENTOS DE 48 E 72 HORAS

Como já foi dito no primeiro ponto deste capítulo, todas as simulações apresentadas e comentadas até aqui, foram calculadas tendo por base um evento de 12 horas. Este dado influencia apenas os resultados referentes ao modelo Eros, já que para o Copla, os eventos são de 500 segundos. Por isso, apenas para os gráficos referentes ao Eros se poderão notar diferenças consoante a duração da simulação.

A escolha da simulação a testar para os diferentes tempos totais de evento foi baseada na resposta do modelo para as simulações de 12 horas, ou seja, foi escolhida uma simulação que apresentasse bons resultados para a situação de 12 horas, figura 6.30.

A simulação escolhida diz respeito a uma altura de onda de 2 metros, período de 18 segundos, nível de maré de 0 (ZH) metros e orientação da agitação de noroeste. Na figura 6.30 está representada a simulação referente às 12 horas de evento. Nas figuras 6.31a) e 6.31b) estão, respectivamente, as simulações de 48 horas e 72 horas.

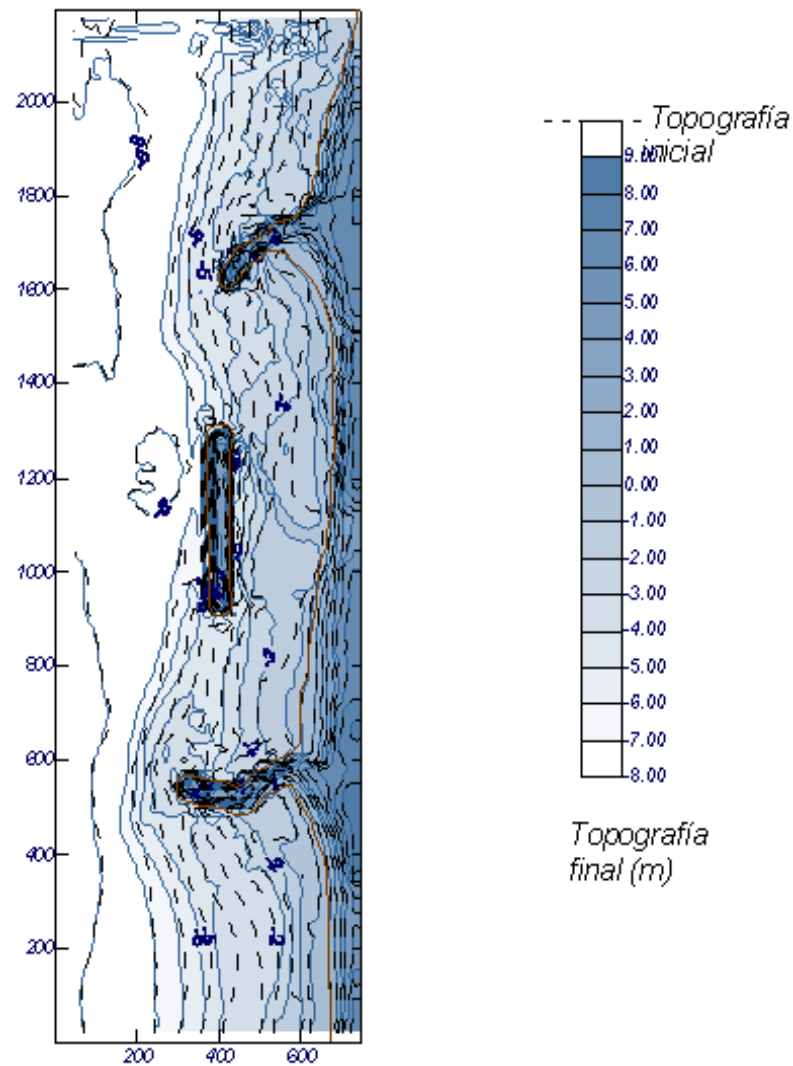


Figura 6.30 - Variação da batimetria para 12 horas

Se, para 12 horas de simulação, apesar das poucas alterações das batimétricas, se inicia uma tendência, essencialmente entre o esporão norte e o quebramar destacado, de rotação das batimétricas para uma orientação paralela às frentes de onda, nas simulações seguintes, pode verificar-se esta crescente tendência, assim como uma tendência de avanço das batimétricas na direcção de oeste na zona de sotamar do quebramar, indiciando o que poderá resultar numa saliência se continuasse a acontecer uma agitação favorável, ou seja, com as mesmas características da simulação.

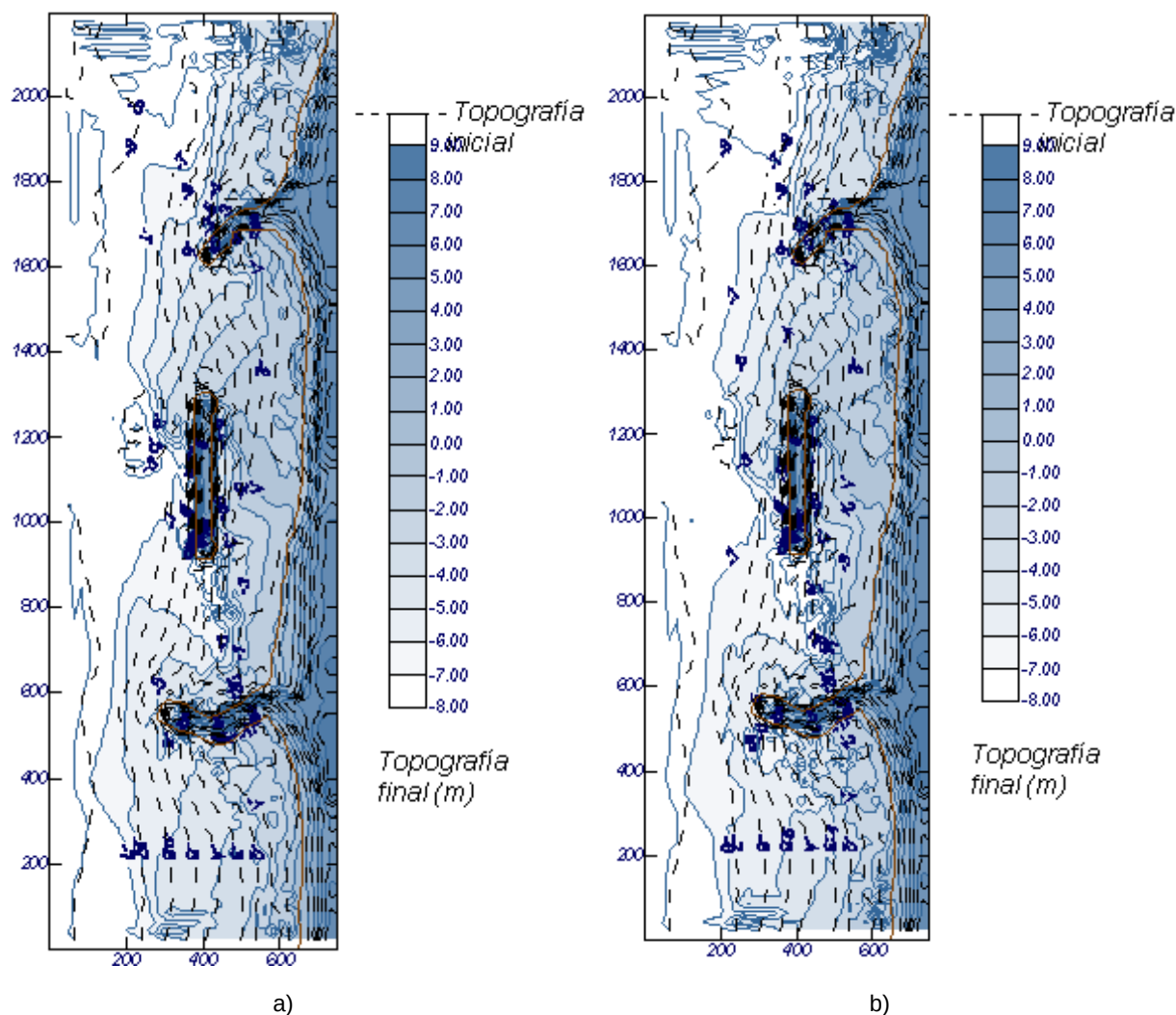


Figura 6.31 - a) Variação da batimetria para 48 horas, b) Variação da batimetria para 72 horas

6.2.4. SIMULAÇÕES COM O QUEBRAMAR DESTACADO E TÔMBOLO

Neste ponto será analisada a existência de um tómbolo a sotamar, tomando este, uma das formas de equilíbrio disponíveis no *software* SMC, e descritas no capítulo 3.

Atendendo a que o transporte sedimentar de Norte para Sul não é aparentemente significativo, se a acumulação pretendida não se verificar será de equacionar outro tipo de intervenção.

A alimentação artificial do tómbolo a sotamar do quebramar destacado pode-se afirmar como uma medida eficaz pois os sedimentos depositados serão posteriormente protegidos pela mesma estrutura, e não transportados pela corrente longitudinal, embora ajustados pelas correntes de difracção (Pereira 2008).

A figura 6.32. refere-se a à batimetria final com quebramar destacado e o tómbolo criado com o *software* SMC, usando o MMT e o Arpa, que servirá de base ao estudo com o Mopla.

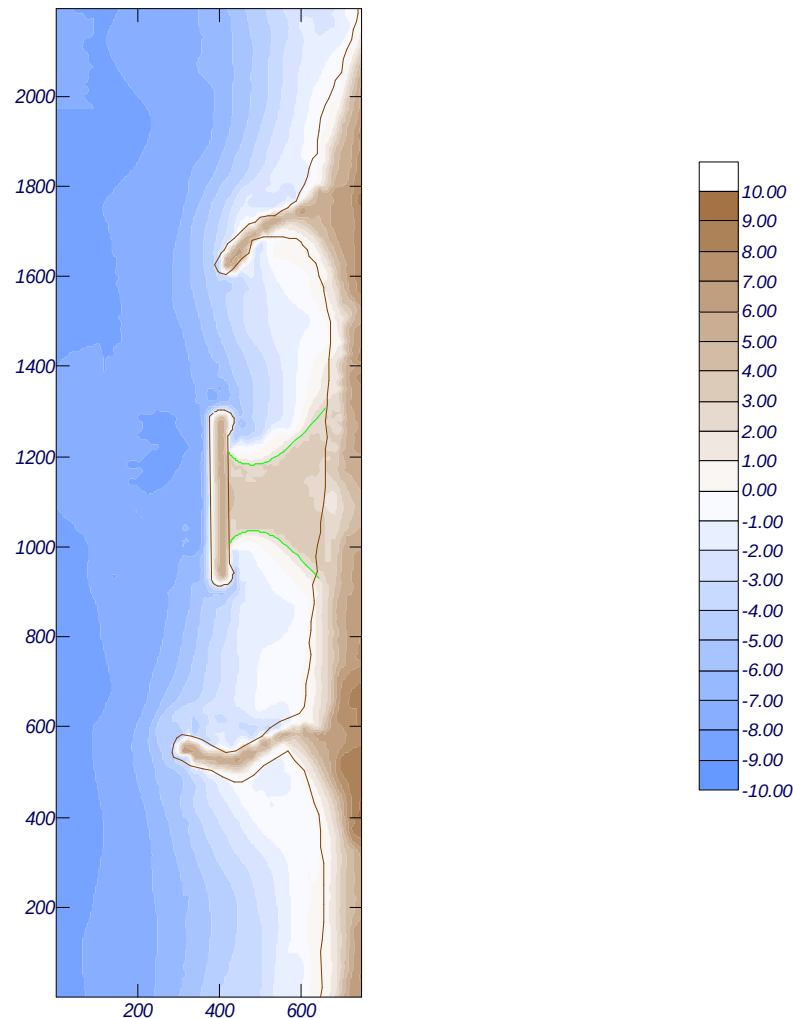


Figura 6.32 - Representação a duas dimensões da batimetria com o quebramar destacado e tômbolo (metros, ao ZH)

Para além do que já tinha sido representado na figura 6.16, existem agora duas linhas a verde na figura 6.32, que delimitam o tômbolo, representando as novas linhas de costa. Estas interceptam uma aproximação da linha de costa inicial representada pela linha a castanho.

Antes de avançar com as simulações usando o Mopla, é necessário referir as características do tômbolo. Como foi descrito nos capítulos 3 e 4, o SMC, em articulação com o MMT, permite criar quatro tipos de praia em equilíbrio, usando a metodologia de González e Medina. Para este caso foi escolhido o modelo parabólico de Tan e Chiew (1994). Com este modelo foram construídas as duas linhas de costa representadas a verde, ambas com as características a seguir descritas, estando entre parêntesis os parâmetros não editáveis e calculados pelo programa através dos dados inseridos.

Planta de equilíbrio:

- Forma em planta: Tan e Chiew (1994);
- Frente de agitação: orientação noroeste, profundidade da água no ponto de difracção para baixa-mar de águas vivas $h_d=5.0$ metros e período de 12 segundos;
- Distância da linha de costa: $Y= 100$ metros ($R_0=193,1$ metros), $\alpha_{\min}=58,811^\circ$, $\beta=31,2^\circ$ e $Y/L_d=1,22$;

- Batimétrica da linha de costa considerada: +2,0 (ZH) metros.

Perfil de equilíbrio:

- Perfil de pé de talude: 1Vertical: 12Horizontal;
- Praia seca: altura de berma de 1,0 metro e largura de frente de praia de 3,0 metros;
- Tipo de perfil: perfil de um tramo.

Por limitações do próprio *software*, todo o tómbolo tem a mesma cota de +2,0 (ZH) metros, ao contrário da pendente decrescente que deveria apresentar no sentido linha de costa-quebramar destacado.

De forma a verificar a estimativa proposta por Pereira (2008) de que seriam necessários 250 000 m³, foi calculado o volume através do MMT, tendo sido encontrado o valor de 227 000 m³ para formar o tómbolo com as características descritas. É possível concluir que o volume apresentado por Pereira (2008) difere deste apenas 10%.

Para além de permitir o cálculo do volume total, é possível também representar perfis transversais do tómbolo, paralelos à nova linha de costa, que sobrepõem a batimetria-base e a nova batimetria criada pelo volume de areia a depositar. No anexo C estão representados dois perfis transversais das duas novas frentes de praia para o ponto P₀, ponto onde a linha de costa se torna paralela à crista das ondas incidentes.

Para verificar a viabilidade da manutenção deste volume de areia foram feitas algumas simulações com as mesmas características das realizadas até aqui. Para além das diferentes alterações óbvias, provocadas pelo tómbolo nas frentes de onda e na variação espacial de alturas de onda, verificaram-se diferenças sobretudo nos gráficos referentes aos vectores corrente e aos vectores transporte potencial.

Para simulações com altura de onda de 5 metros e nível de maré 0 (ZH) metros, verifica-se um bom funcionamento do tómbolo, interrompendo tanto as correntes como o transporte potencial. As figuras 6.33a) e 6.33b) apresentam um exemplo disso, comparando duas simulações com as mesmas características, diferindo apenas na existência do tómbolo. Na figura 6.23a), estão representados os vectores transporte potencial-magnitude para a mesma situação da figura 6.33a) e como se pode ver, mesmo sem o tómbolo, a zona a sotamar do quebramar destacado já estava fora dos locais com maior magnitude. Tendo em conta a cota do tómbolo idealizado, é de esperar que esteja submerso para a grande maioria das preia-mar durante o ano. Nas simulações com nível de maré ou amplitude de +4,0 (ZH) metros este aspecto torna-se evidente, com a clara continuidade do escoamento na zona do tómbolo, apesar de apresentar características diferentes inerentes à diferente batimetria onde está a acontecer a simulação.

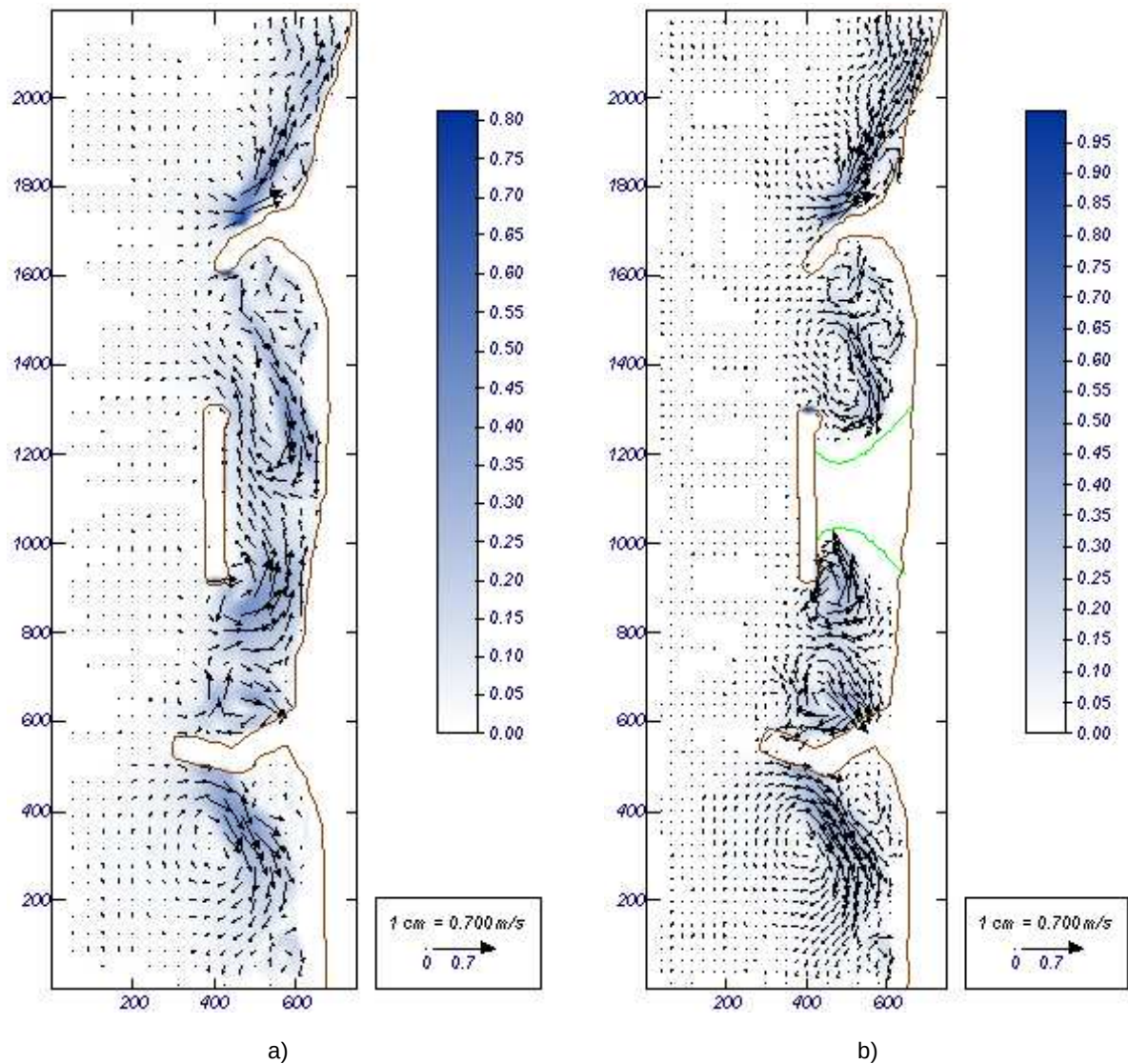


Figura 6.33 - a) Vectors corrente-magnitude para um período de 18 segundos, altura de onda de 5 metros, nível de maré 0 (ZH) metros e orientação da agitação noroeste, b) Vectors corrente-magnitude para a mesma situação, mas com tómbolo

Nesse sentido foi realizada uma simulação com agitação irregular com altura de onda significativa de 5 metros, período de pico de 12 segundos, amplitude de maré de +4,0 (ZH) metros e espectro direccional de N65°W (+/- 25°). Ao comparar os gráficos referentes aos vectors correntes-magnitude, para simulações semelhantes, diferindo apenas na existência do tómbolo, figura 6.28b) e 6.34, verifica-se um claro aumento das velocidades de corrente na zona do tómbolo, atingindo velocidades próximas de 0,45 m/s em zonas que sem tómbolo tinham apenas 0,10 m/s, e uma nova zona de grandes velocidades situada a barlar do quebramar destacado.

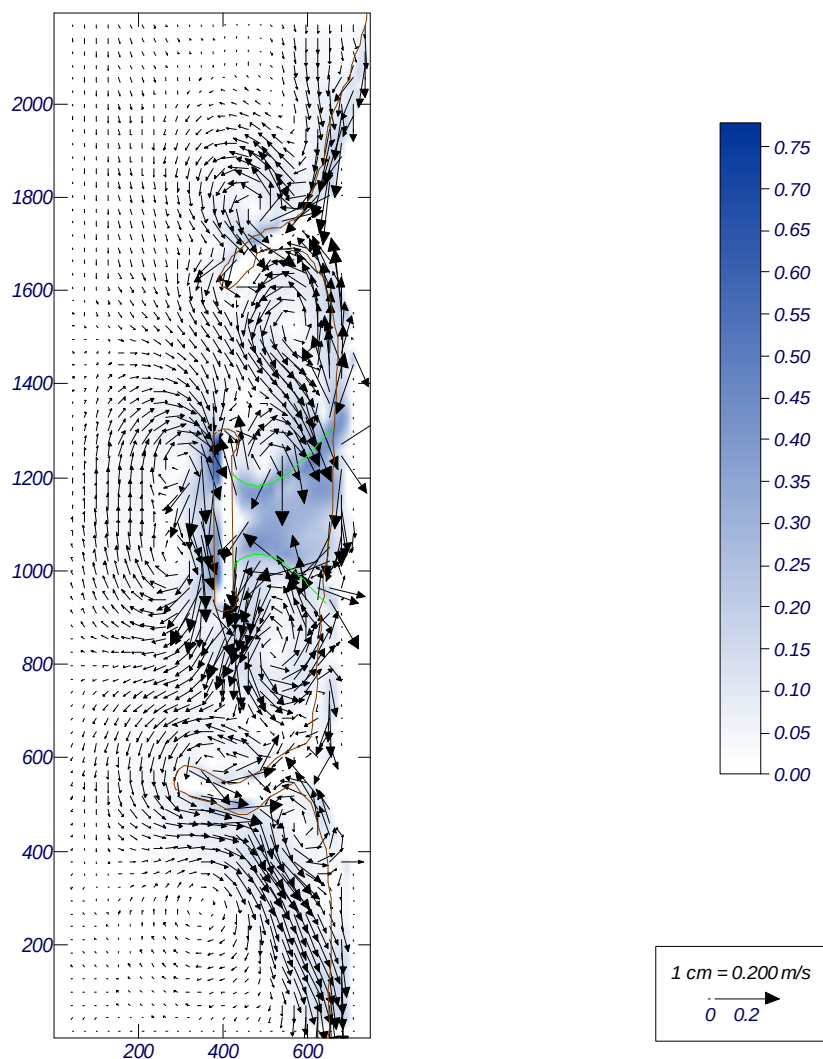


Figura 6.34 - Vectors corrente-magnitude para situação de período de pico de 12 segundos, altura de onda significativa de 5 metros, amplitude de maré de +4,0 (ZH) metros, orientação da agitação N65°W (+/- 25°) e com tómbolo

Para a mesma simulação, ao analisar agora os gráficos dos vectores transporte potencial-magnitude e variação da batimetria, verificou-se que apesar das fortes correntes, os vectores transporte potencial pouco se alteraram em relação à situação sem tómbolo, figuras 6.29a) e 6.35a), e o tómbolo parece não ter sofrido alterações significativas, pois como se pode ver na figura 6.35b), as batimétricas não apresentam alterações notórias, tal como já acontecia sem o tómbolo, figura 6.29b).

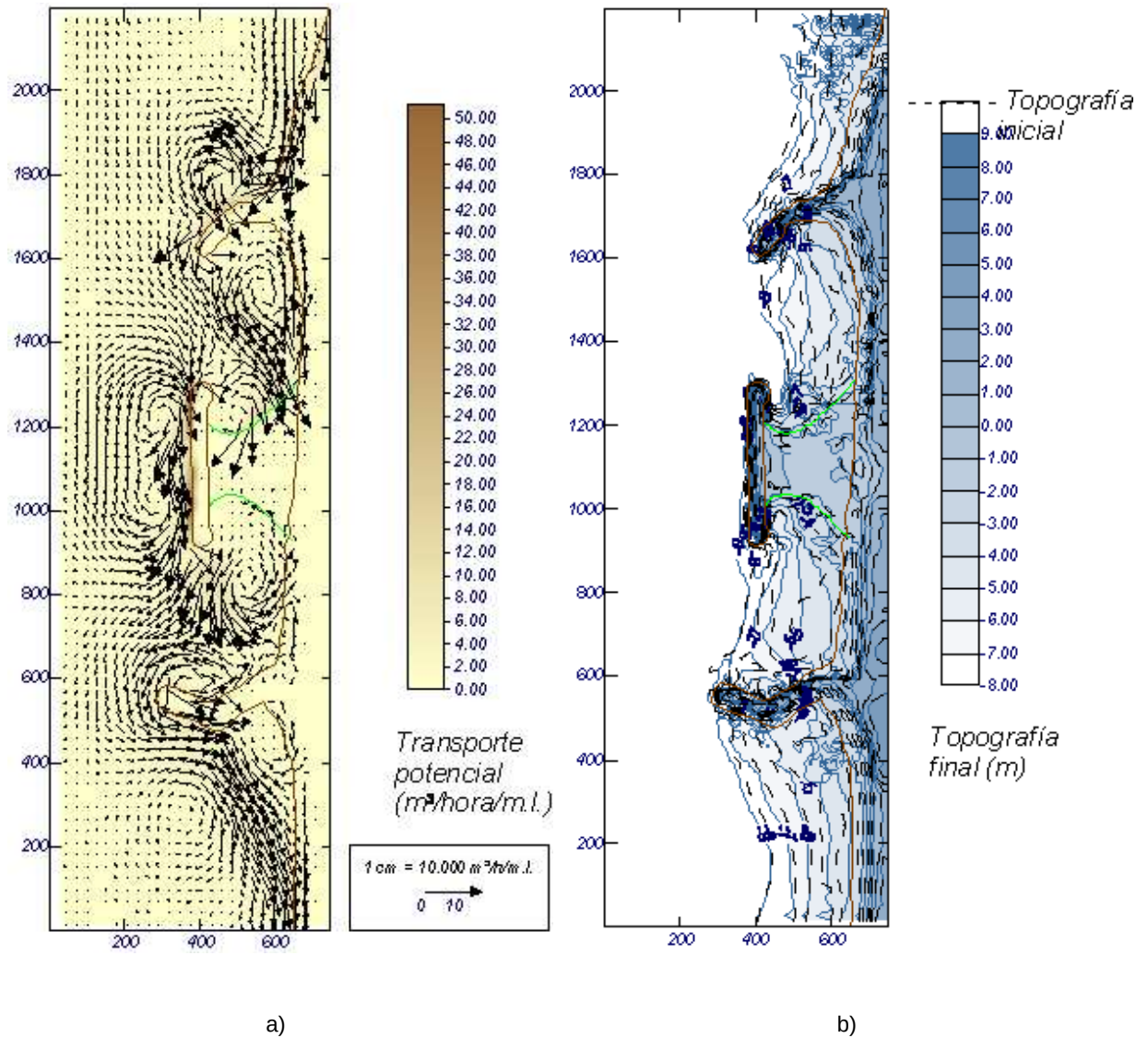


Figura 6.35 - a) Vectores transporte potencial-magnitude para a situação de período de pico de 12 segundos, altura de onda significativa de 5 metros, amplitude de maré de +4,0 (ZH) metros, orientação da agitação N65°W (+/- 25°) e com tómbolo, b) Variação da batimetria para a mesma simulação

7

CONCLUSÕES

7.1. SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, que visou a modelação numérica do quebramar destacado dimensionado por Pereira (2008), estudando a hidrodinâmica e hidromorfologia da linha de costa da cidade de Espinho, com base em diversas situações de agitação, foram atingidos resultados interessantes, que permitiram concluir alguns aspectos relativos ao seu funcionamento.

Com os resultados alcançados e já extensamente analisados no capítulo 6, foi então possível concluir que apesar da protecção da zona que apresenta maiores problemas, poderiam ser criados novos locais de instabilidade, migrando para norte o ponto de maior magnitude, tanto das correntes como do transporte potencial. Em paralelo com esta questão, registou-se um aumento dos valores máximos das velocidades de correntes e do transporte potencial, já referidos no capítulo 6, o que também poderá suscitar dúvidas quanto à eficiência deste quebramar destacado, a menos que a sua disposição e características fossem optimizadas (dimensões, orientação, posição, profundidade) de forma a eliminar estes efeitos. A questão de uma maior complexidade de velocidades de correntes provocada pelo quebramar destacado essencialmente na zona próxima das cabeças, foi comprovada, o que poderá criar eventualmente problemas aos utilizadores do local. A possibilidade da manutenção do tómbolo criado artificialmente é de difícil previsão, não só porque se tratam de simulações de curto prazo mas também porque apesar de os resultados apontarem para elevadas velocidades de correntes no local, os resultados referentes ao transporte sedimentar pouco se alteraram com a presença do tómbolo.

Outro aspecto já conhecido, e mais uma vez comprovado com este estudo, é a concentração de grande energia nas zonas próximas dos dois esporões já existentes em Espinho. Poderá dizer-se que em todas as simulações, tanto com a batimetria-base como com o quebramar destacado, verificou-se um grande potencial de transporte e de velocidade de correntes nestas áreas, que se pode associar às indispensáveis e recorrentes acções de manutenção a que são sujeitas estas duas estruturas.

Juntando esta informação à grande variabilidade dos fundos que se verificou para todas as simulações, poderá concluir-se que a construção de um quebramar destacado poderá ter custos elevados, de manutenção se as suas características estruturais não forem reforçadas, já que se adivinha a ocorrência infra-escavações. No entanto, para esse efeito, o seu perfil transversal foi dimensionado de forma a atender a este fenómeno.

A inexistência de um levantamento topo-hidrográfico recente e actualizado é uma das maiores lacunas deste trabalho, visto que foi adoptado um levantamento de 1988, que apesar dos mais de 20 anos de existência, confere os dados mais recentes sobre a costa da cidade de Espinho. No entanto, o quebramar destacado modelado foi também dimensionado usando este levantamento como base.

Apesar da sua elevada importância para uma correcta validação do modelo em estudo, não existem dados relativos a estudos de campo que possam comprovar os valores encontrados para valores como, por exemplo, as velocidades das correntes ou distribuição espacial das alturas de onda, por exemplo

7.2. POTENCIALIDADES E DEBILIDADES DO SOFTWARE SMC

Tal como todos os outros *software* de modelação numérica, o SMC é uma ferramenta importante, como complemento à modelação física e às medições de campo, visto que nunca poderá reproduzir fenómenos de tamanha complexidade baseando-se apenas em dados de agitação, características de sedimentos, levantamentos batimétricos e modelos numéricos, por muito avançados que sejam. Serve no entanto de primeira análise para problemas costeiros, tal como é o caso estudado neste trabalho, essencialmente a nível hidrodinâmico e morfodinâmico.

Apesar de ter sido usado na Faculdade de Engenharia do Porto pela primeira vez, e de os manuais serem um pouco incompletos, a utilização do SMC não foi muito complicada. Apesar de não ser um *software* comercial, possui uma interface razoavelmente simples de utilizar, para um utilizador com conhecimentos gerais sobre agitação marítima e engenharia costeira. Os processos de cálculo poderão tornar-se algo lentos em algumas situações, mas na sua generalidade apresentam tempos aceitáveis, não prejudicando muito o desenvolvimento de um estudo. A título de exemplo, a simulação de um evento de 12 horas, como é o caso da generalidade dos exemplos calculados, poderá demorar cerca de 30 minutos para completar o cálculo e cerca de 10 minutos adicionais para exportar as representações gráficas pretendidas.

Contudo, o *software* SMC também apresenta debilidades ou desvantagens, sendo que algumas delas se tornam um pouco limitativas para a sua utilização.

Um aspecto que seria importante para este estudo e que foi impossível simular, é a distribuição dos sedimentos que vêm de norte, oriundos essencialmente do rio Douro, para as diversas simulações usadas. Este *input* de sedimentos vindos do rio Douro é um dado essencial para a previsão de uma possível acumulação de sedimentos formando uma saliência ou tómbolo, ou também a manutenção de uma alimentação artificial.

Associado a este aspecto, também teria sido interessante a simulação a longo prazo dos fenómenos estudados, ou seja, meses ou até anos, com as variações habituais de condições de agitação, nível de maré e recarga de sedimentos associadas a estes intervalos de tempo mais extensos. No entanto o *software* ainda não permite um estudo para um intervalo de tempo tão prolongado.

A impossibilidade de controlar a escala de alguns parâmetros, na representação gráfica dos fenómenos, poderá ser apontada também como uma debilidade deste *software*, pois por vezes toma valores que podem levar a uma má interpretação dos mesmos, e também poderá tornar difícil a comparação entre as várias simulações.

7.3. SUGESTÕES DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como já foi dito no decurso do trabalho, nem todos os módulos e programas descritos de forma breve, e em alguns casos apenas referidos, no capítulo 4 foram utilizados no âmbito deste trabalho. O módulo Pré-processo que engloba os programas Baco, Odín e Atlas, deverá ser de difícil aplicação para trabalhos deste tipo, visto que apenas possui em base de dados informações relativas à costa espanhola. Apesar disso, ficará em aberto a proposta a compilação de dados que possam formar no futuro uma base importante para o estudo da costa portuguesa, da mesma forma que esta serve a costa

espanhola. Para o Baco seriam necessárias cartas náuticas e batimetrias actualizadas da costa portuguesa, para o Odín seria decerto interessante um estudo geral da agitação marítima no nosso país permitindo depois para qualquer ponto da costa conhecer as características da agitação média, e por fim para o Atlas desenvolver um estudo de cotas de inundação das principais zonas urbanas costeiras portuguesas.

Para o módulo de análise de curto prazo, apenas foi utilizado o programa de morfodinâmica de praias, o Mopla, enquanto que o Petra, que estuda a evolução do perfil transversal será também de explorar, visto que estuda os mesmos fenómenos mas a duas dimensões verticais.

Em termos de uma possível continuação do estudo realizado neste trabalho, poderiam ser testados mais valores para o período da onda, altura de onda, e orientação da agitação, assim como a utilização de espectros com diferentes características, tanto os espectros de frequências como os direccionais já que para agitação irregular o programa produziu melhores resultados, podendo ser melhor explorado este facto. Outro aspecto de interesse poderia ser o estudo de um quebramar destacado com outra orientação, outras dimensões, tanto em termos de desenvolvimento como em termos de altura, e até um sistema de dois quebramares destacados menores, podendo assim avaliar qual a melhor estrutura para a protecção da linha de costa de Espinho. Este estudo sairia do âmbito deste trabalho, pois a alteração da posição e da orientação do quebramar destacado em relação à linha de costa traria também mudanças a nível estrutural que não foram abordadas nem consideradas neste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

Abbott, M. B., Price A.W. (1994). *Coastal, estuarial, and harbour engineers' reference book*. Taylor & Francis.

Angremond, K. D', Roode, F.C. Van (2004). *Breakwaters and closure dams*. Taylor & Francis.

French, P.W., (2002). *Coastal Defences: Processes Problems and Solutions*. Routledge.

Gonzalez, M., Medina, R., (2001). *On the application of static equilibrium bay formations to natural and man-made beaches*. Coastal Engineering, 43 (3-4), 209-225.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. *Manual de referencia Copla 3.0*. Universidad de Cantabria.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. *Manual de referencia Eros 3.0*. Universidad de Cantabria.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. *Manual de referencia Oluca 3.0*. Universidad de Cantabria.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. *Manual del usuario Baco 3.0*. Universidad de Cantabria.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. *Manual del usuario Mopla 3.0*. Universidad de Cantabria.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. *Manual del usuario Odín 3.0*. Universidad de Cantabria.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. *Manual del usuario Petra 3.0*. Universidad de Cantabria.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. *Manual del usuario SMC 3.0*. Universidad de Cantabria.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. *Manual del usuario Tic 3.0*. Universidad de Cantabria.

Herbich, J.B. (2000). Offshore (detached) breakwaters. In Handbook of Coastal Engineering, pp 5.2-5.97, McGraw-Hill Handbooks, Texas, EUA.

Hsu, J.R.C. e Evans, C., (1989). *Parabolic bay shapes and applications*. Proceedings, Institution of Civil Engineers, 87(2), 557-570.

Hsu, J.R.-C., Benedet, L., Klein, A.H.F.; Raabe, A.L.A.; Tsai, C.-P., Hsu, T.-W., (2008). *Appreciation of static bay beach concept for coastal management and protection*, Journal of Coastal Research, 24(1), 198-215. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.

<http://books.google.com/>. Abril de 2009

<http://www.moptc.pt/>. Abril de 2009

<http://www.panoramio.com/>. Maio de 2009

Institution of Civil Engineers, (2002). *Breakwaters, coastal structures and coastlines: proceedings of the international conference organized by the Institution of Civil Engineers*, 26-28 Setembro 2001, Londres, Thomas Telford.

- Mota Oliveira, I. B. e Martins, Licínio M. P. (1991). *Obras de Defesa e de Reconstrução das Praias de Espinho*. Revista Recursos Hídricos da APRH, Nº 1, Vol 12, pp 71 - 88, APRH, Lisboa. ISSN: 0870-1741.
- Pereira, G. (2008). *Projecto de um Quebramar Destacado de Protecção para a Frente Marítima de Espinho*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Silva, R., Baptista, P., Veloso-Gomes, F., Coelho, C. and Taveira-Pinto, F., (2009). *Sediment Grain Size variation on a coastal stretch facing the North Atlantic (NW Portugal)*. Journal of Coastal Research, SI 56 (Proceedings of the 10th International Coastal Symposium). Lisbon, Portugal, ISBN.
- Silvester, R., Hsu, J.R.C., (1997). *Coastal Stabilization*. World Scientific.
- Soulsby, R. (1997). *Dynamics of marine sands: a manual for practical applications*. Thomas Telford.
- Taveira Pinto, F. (2007). *Análise da Concepção e Dimensionamento Hidráulico-Estrutural de Quebramares Destacados*. Lição de Síntese, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Taveira Pinto, F. (2007). *Dimensionamento Hidráulico e Estrutural de Quebramares de Taludes*. Trabalhos Marítimos 1, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Taveira Pinto, F. e Valente Neves, Ana C. (2003). *A importância da consideração do carácter irregular da agitação marítima no dimensionamento de quebramares de taludes*. Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Veloso Gomes, F., Taveira Pinto, F., das Neves, L. e Pais Barbosa, J. (2006). *Pilot Site of River Douro - Cape Mondego and Case Studies of Estela, Aveiro, Caparica, Vale de Lobo and Azores*, EUrosion, IHRH, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. ISBN: 972-752-074-x
- Yasso, W.E., (1965). *Plan geometry of headland bay beaches*. Journal of Geology 73, 702 - 714.

ANEXO A - SIMULAÇÕES COM A BATIMETRIA-BASE

Simulações:

- Nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2 m, período de 12 s, orientação da agitação de oeste;
- Nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2 m, período de 18 s, orientação da agitação de oeste;
- Nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2 m, período de 12 s, orientação da agitação de noroeste;
- Nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2 m, período de 18 s, orientação da agitação de noroeste;
- Nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de 12 s, orientação da agitação de oeste;
- Nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de 18 s, orientação da agitação de oeste;
- Nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de 12 s, orientação da agitação de noroeste;
- Nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de 18 s, orientação da agitação de noroeste;
- Nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2 m, período de 12 s, orientação da agitação de oeste;
- Nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2 m, período de 18 s, orientação da agitação de oeste;
- Nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2 m, período de 12 s, orientação da agitação de noroeste;
- Nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de 12 s, orientação da agitação de oeste;
- Nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de 18 s, orientação da agitação de oeste;
- Nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de 12 s, orientação da agitação de noroeste;
- Nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de 18 s, orientação da agitação de noroeste;
- Amplitude de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda significativa de 2 m, período de pico de 12 s, e espectro direccional de N65°W (+/-25°);
- Amplitude de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda significativa de 2 m, período de pico de 18 s, e espectro direccional de N65°W (+/-25°);
- Amplitude de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda significativa de 5 m, período de pico de 18 s, e espectro direccional de N65°W (+/-25°).

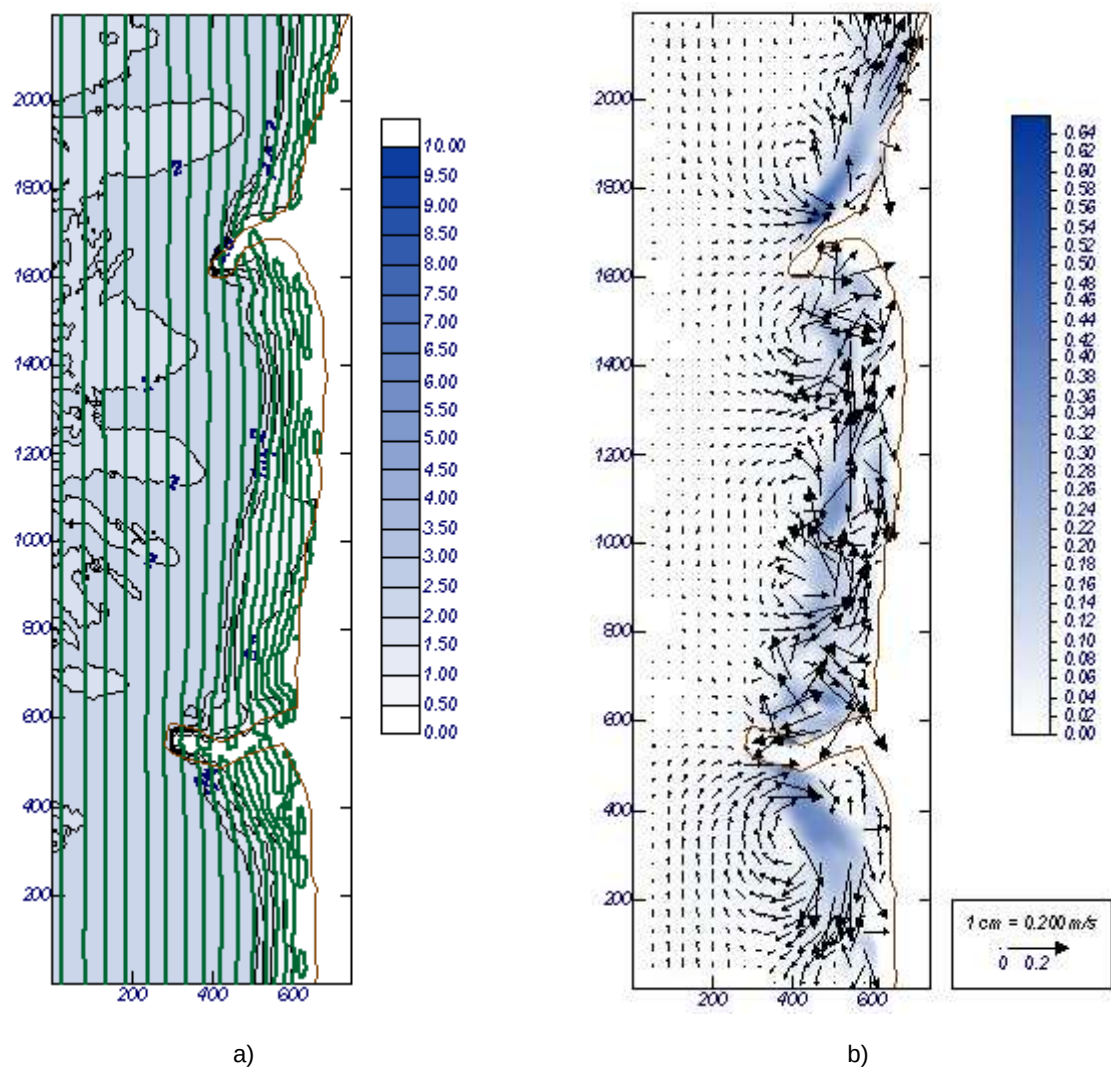


Figura A1 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectors corrente-magnitude, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

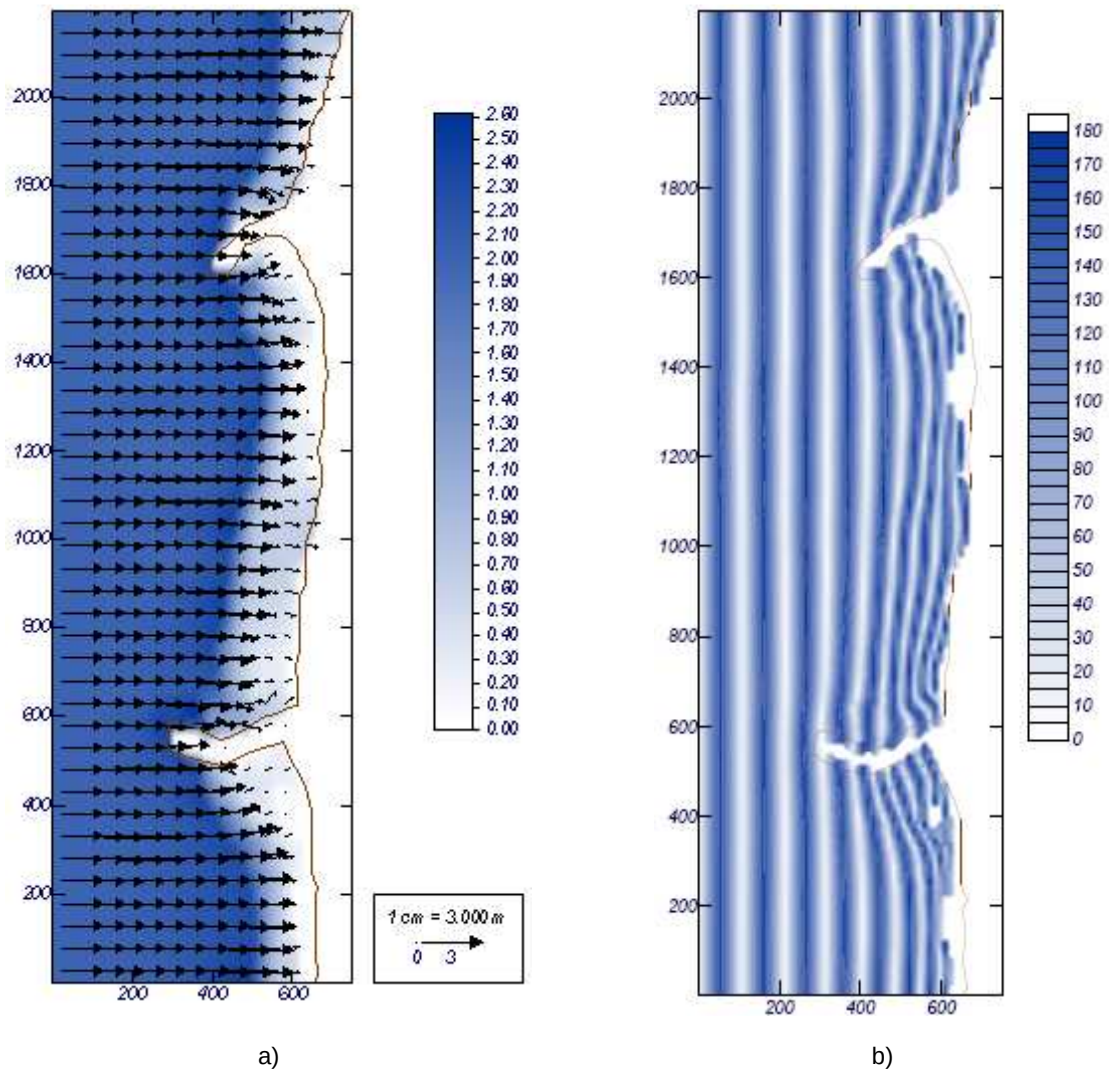


Figura A2 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

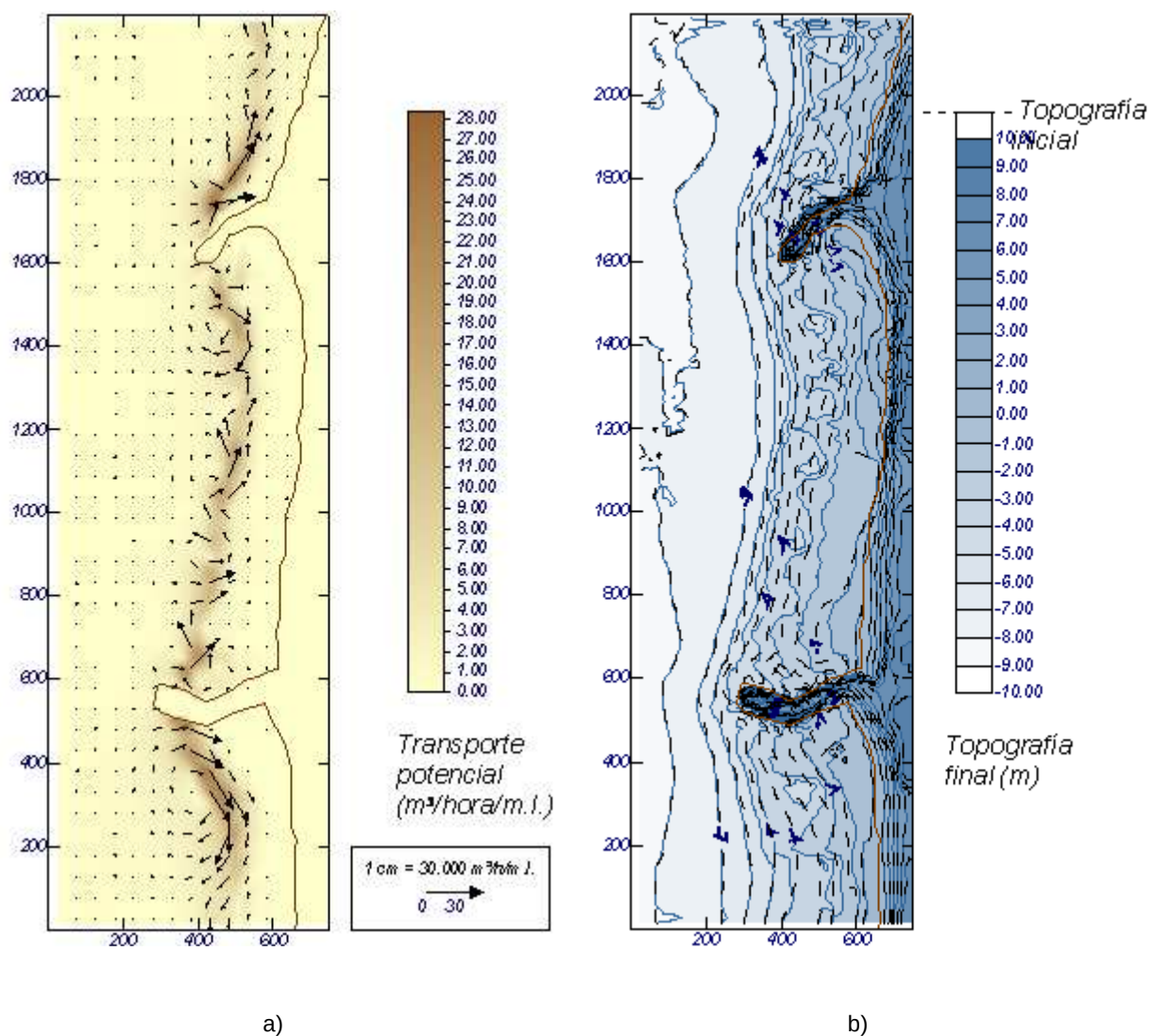


Figura A3 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

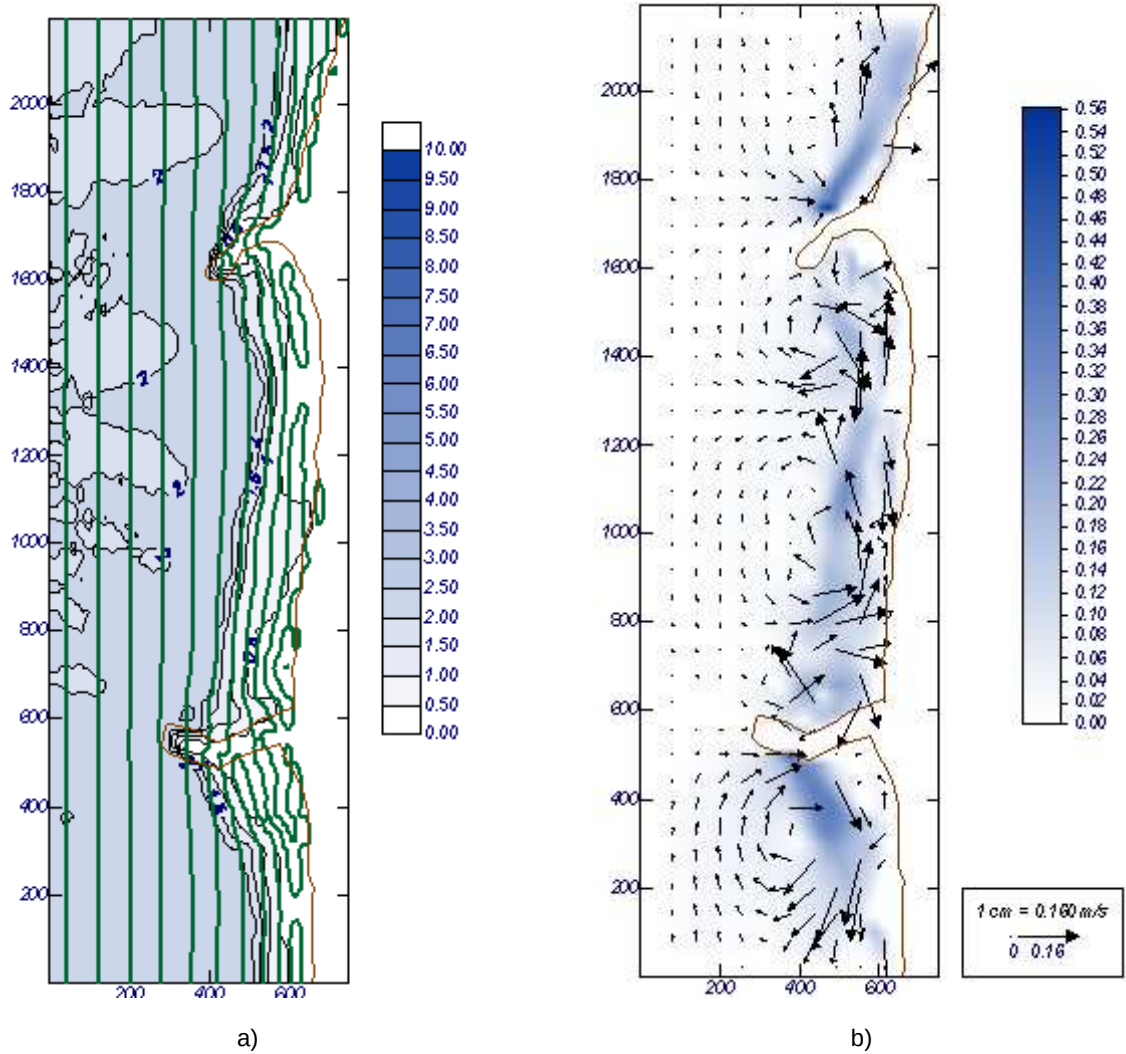


Figura A4 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectors corrente-magnitude, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

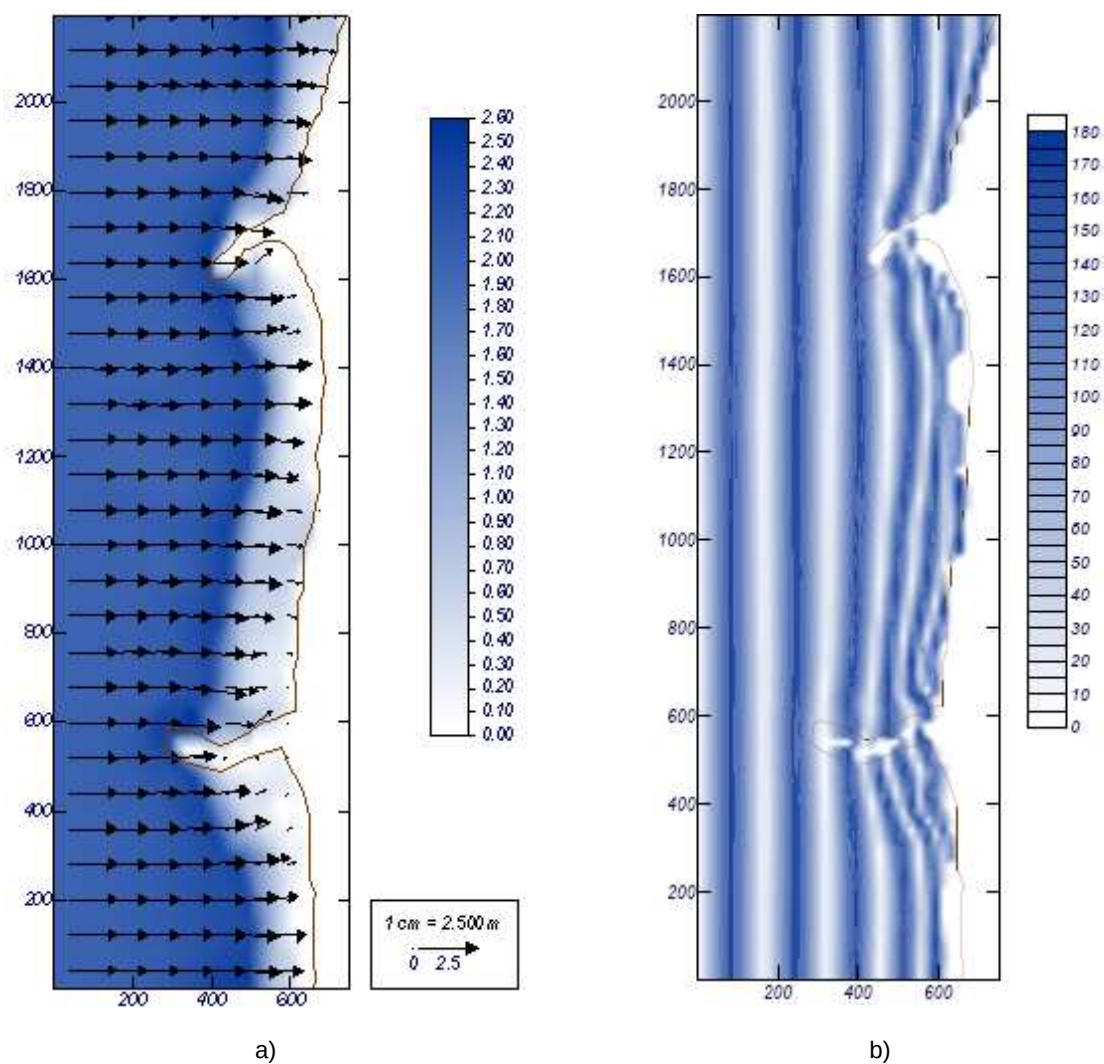


Figura A5 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

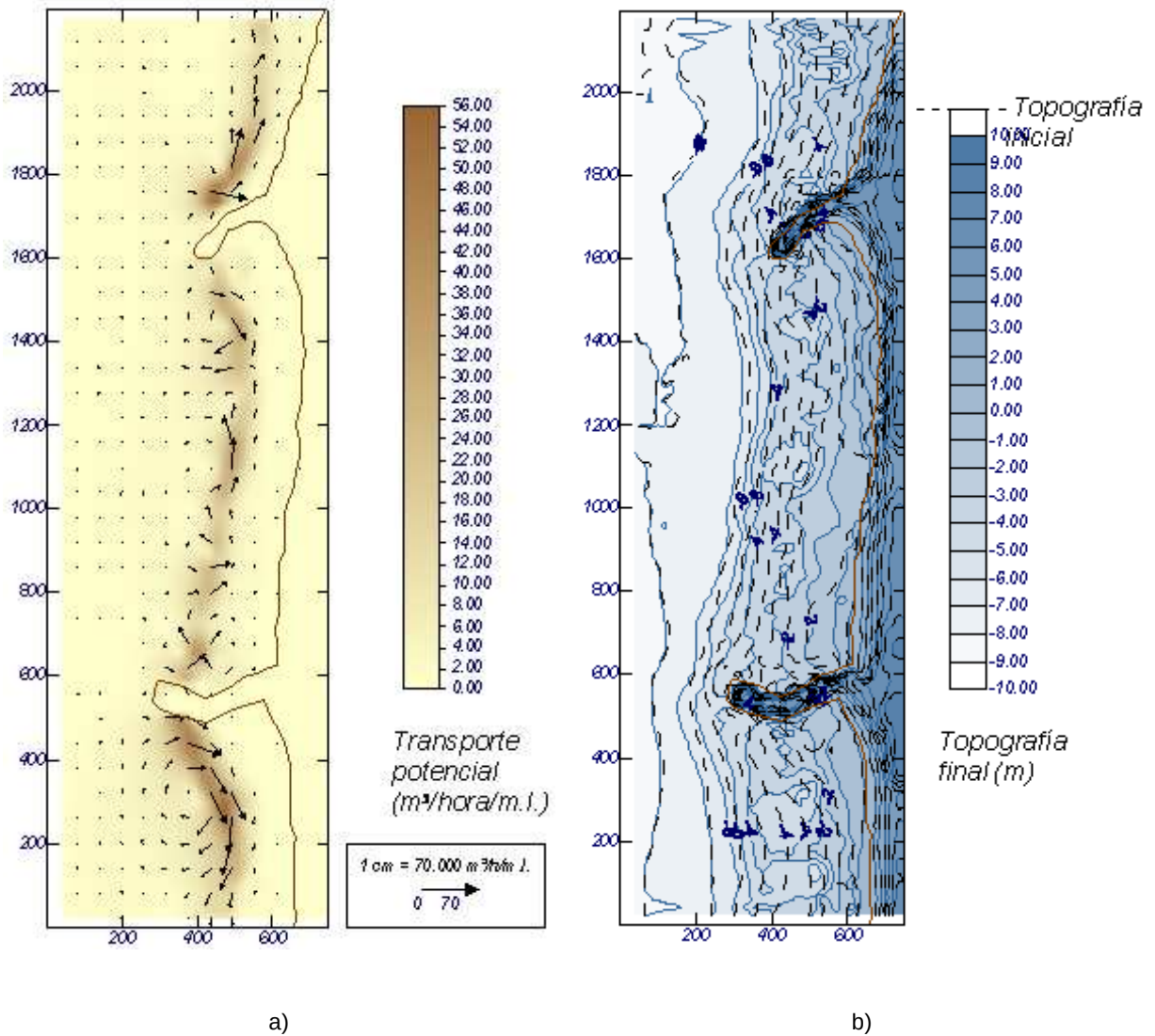


Figura A6 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

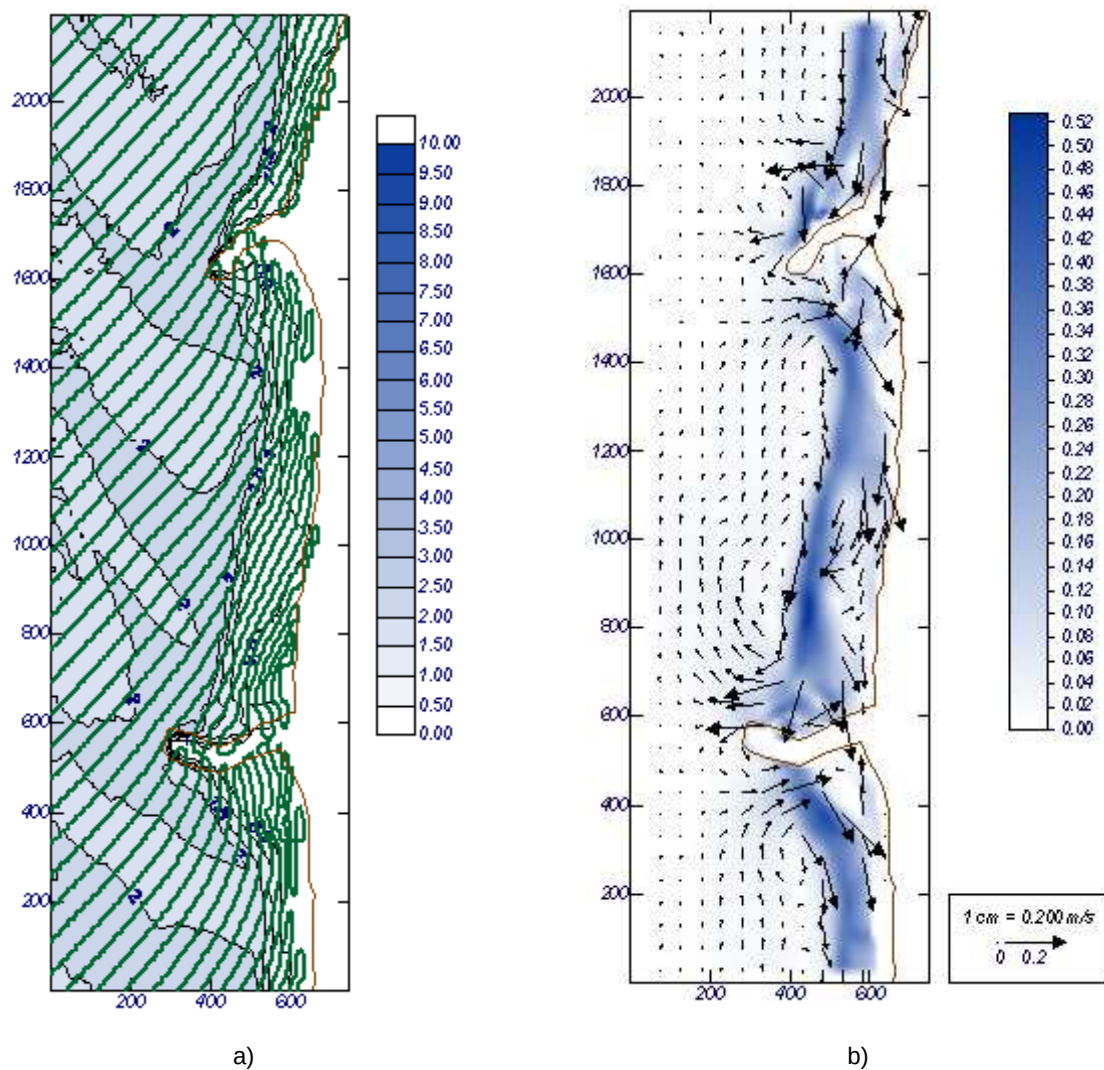


Figura A7 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

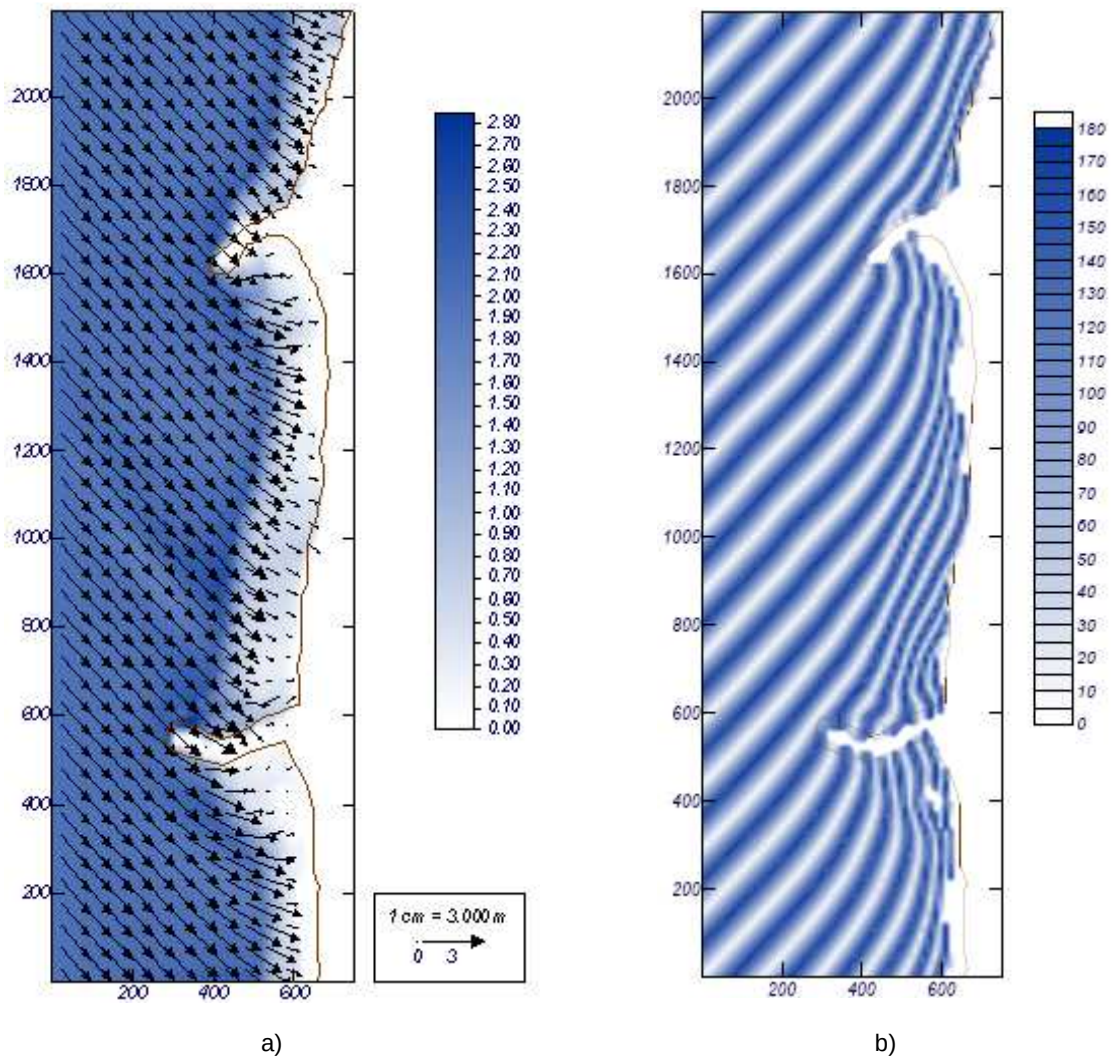


Figura A8 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

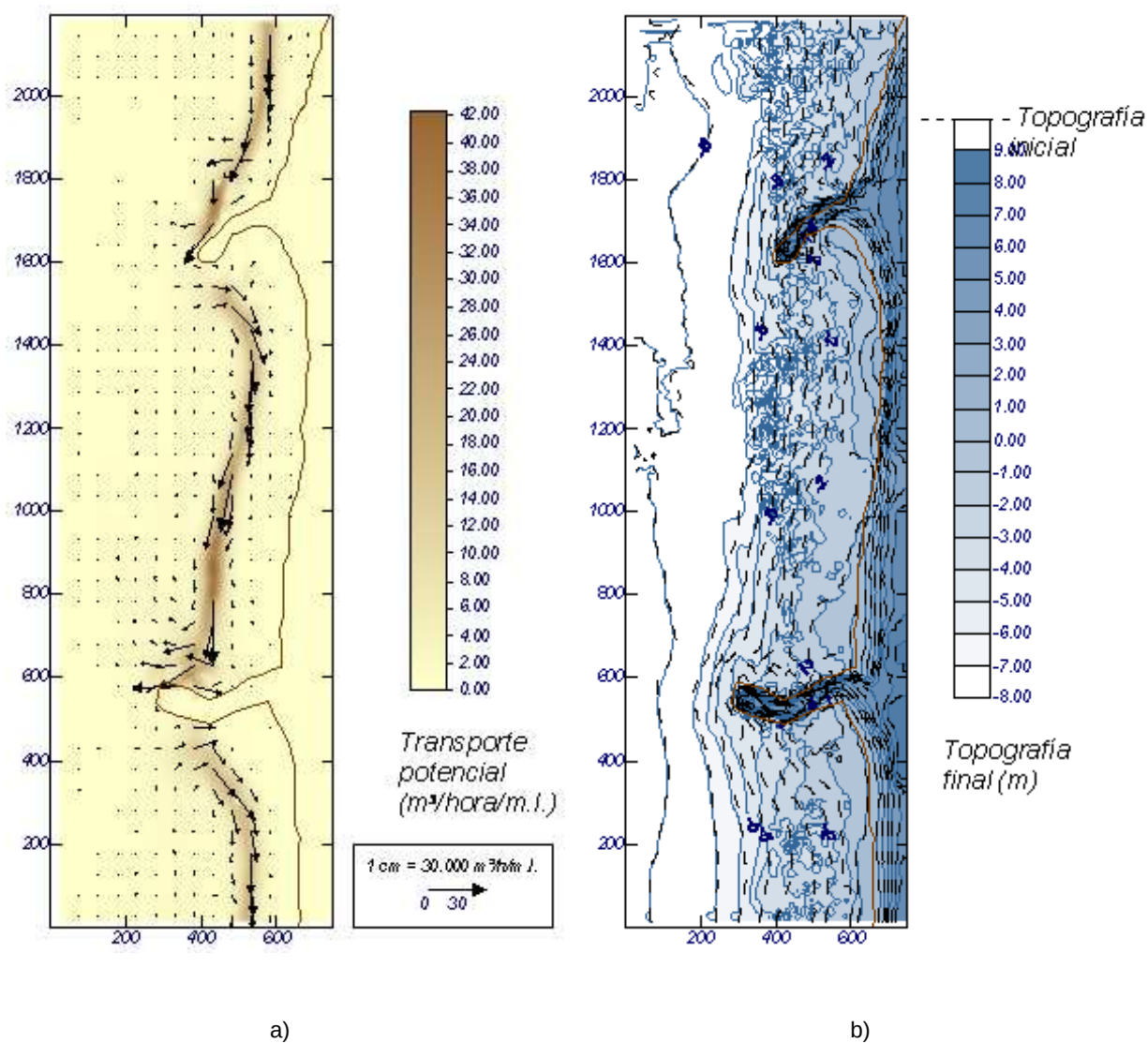


Figura A9 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

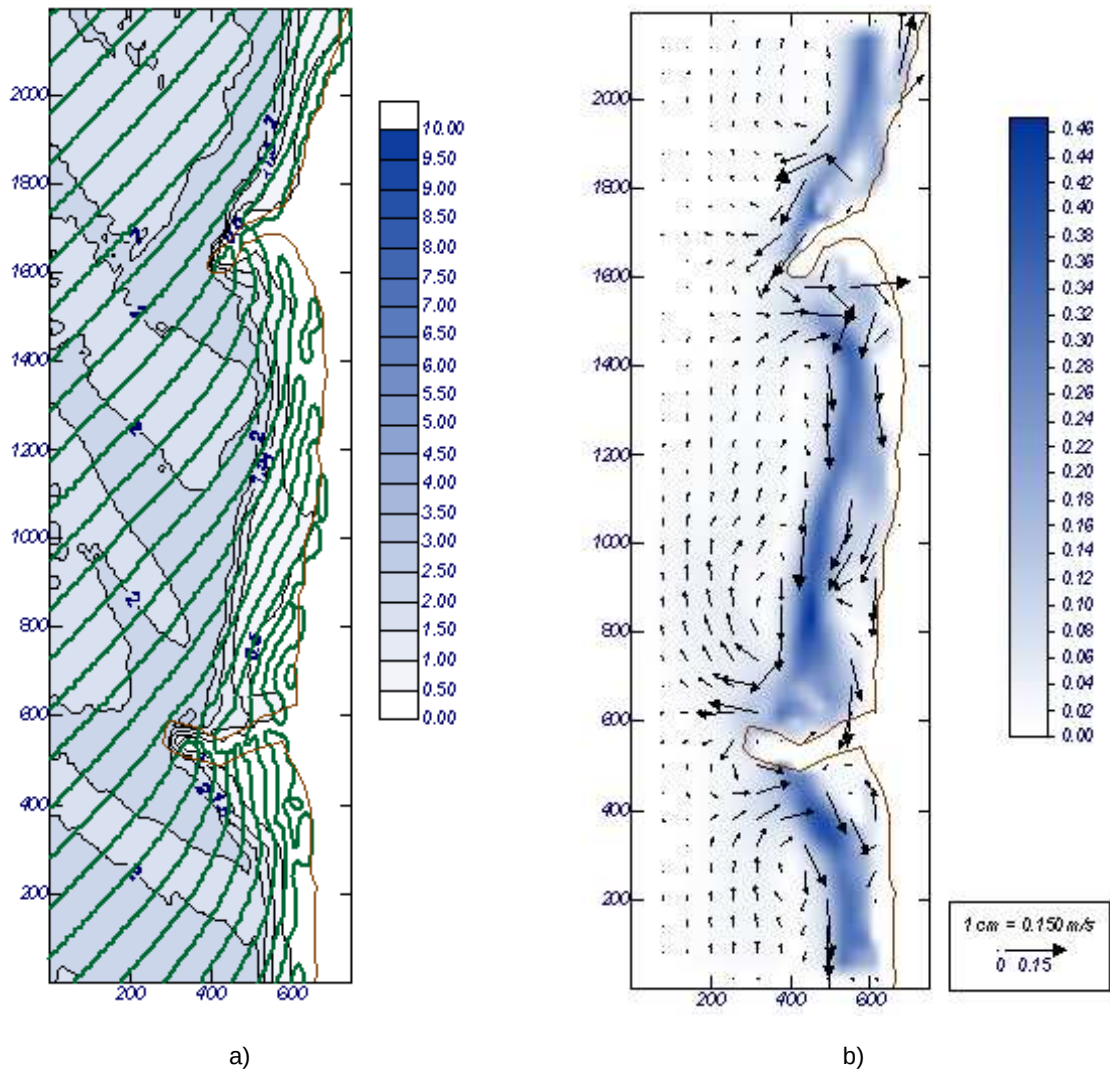


Figura A10 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de noroeste.

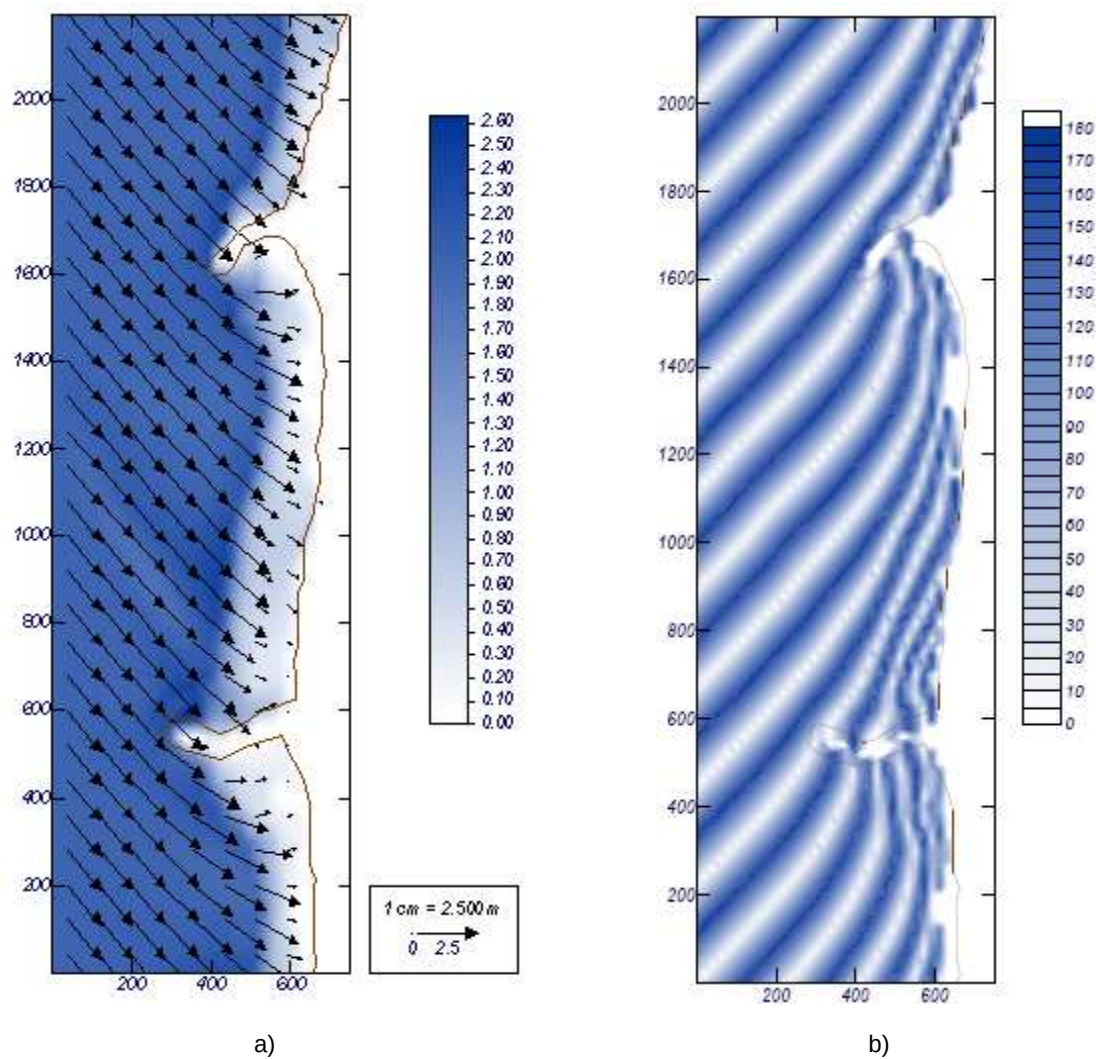


Figura A11 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de noroeste.

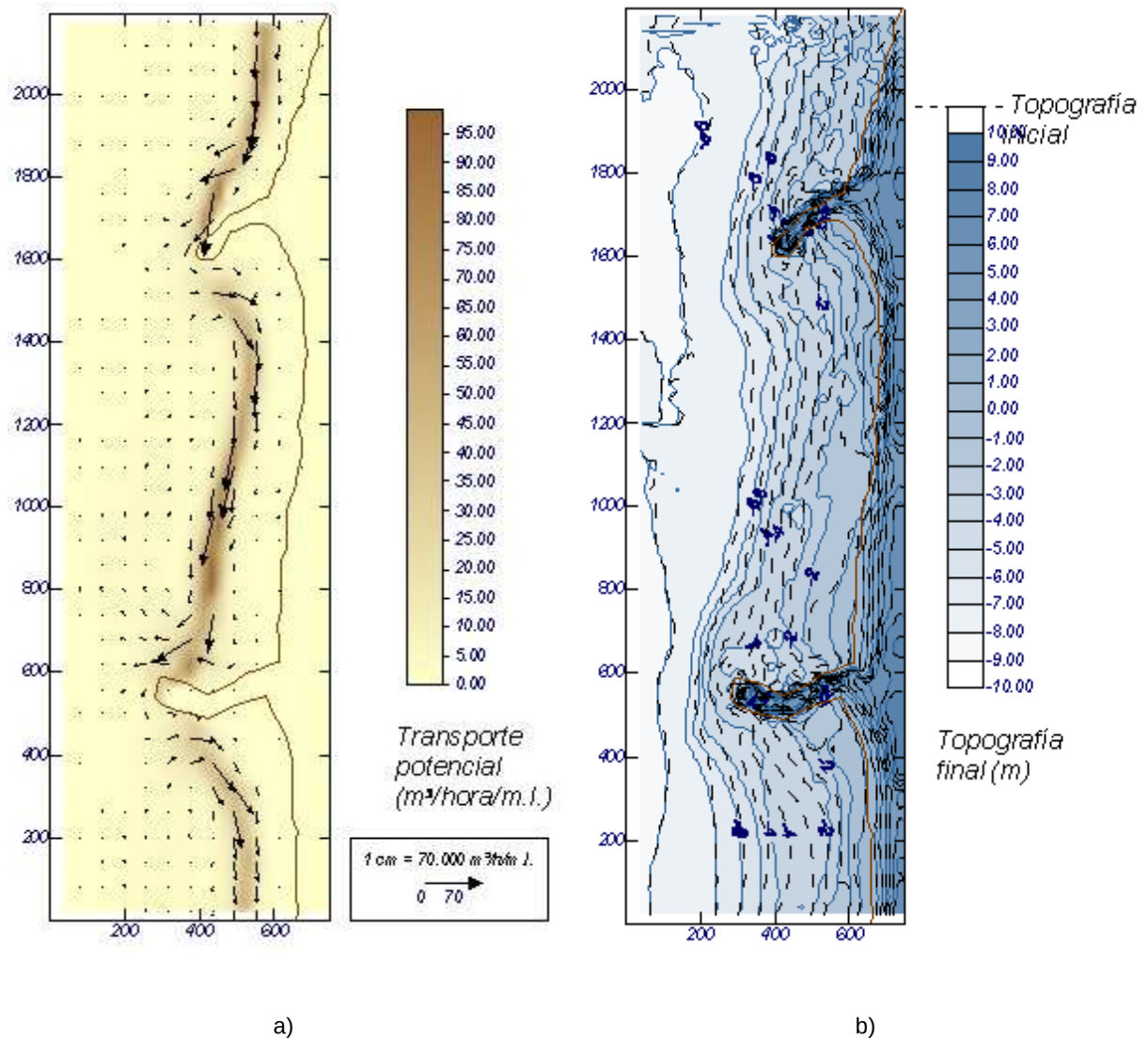


Figura A12 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de noroeste.

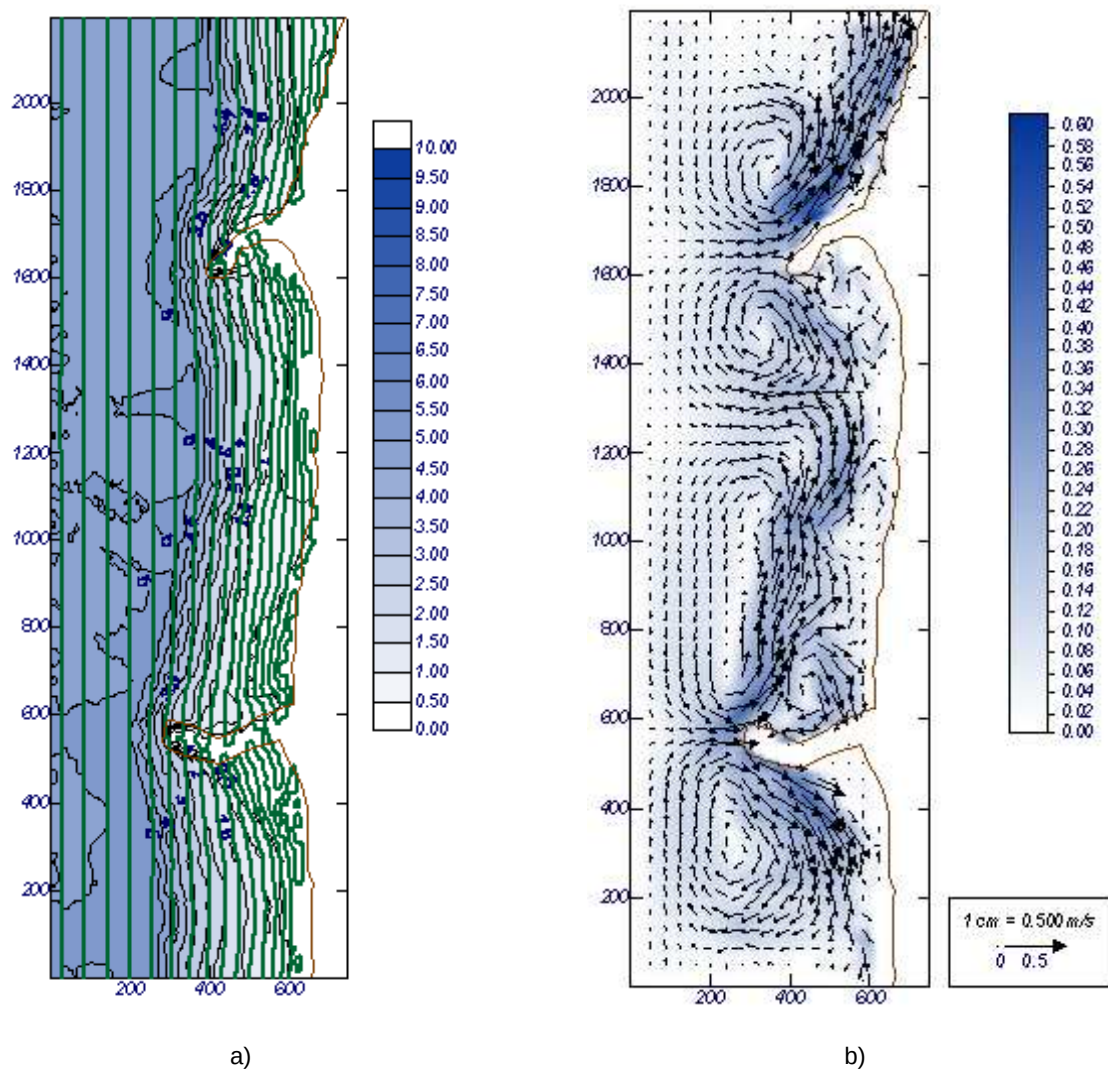


Figura A13 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectors corrente-magnitude, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

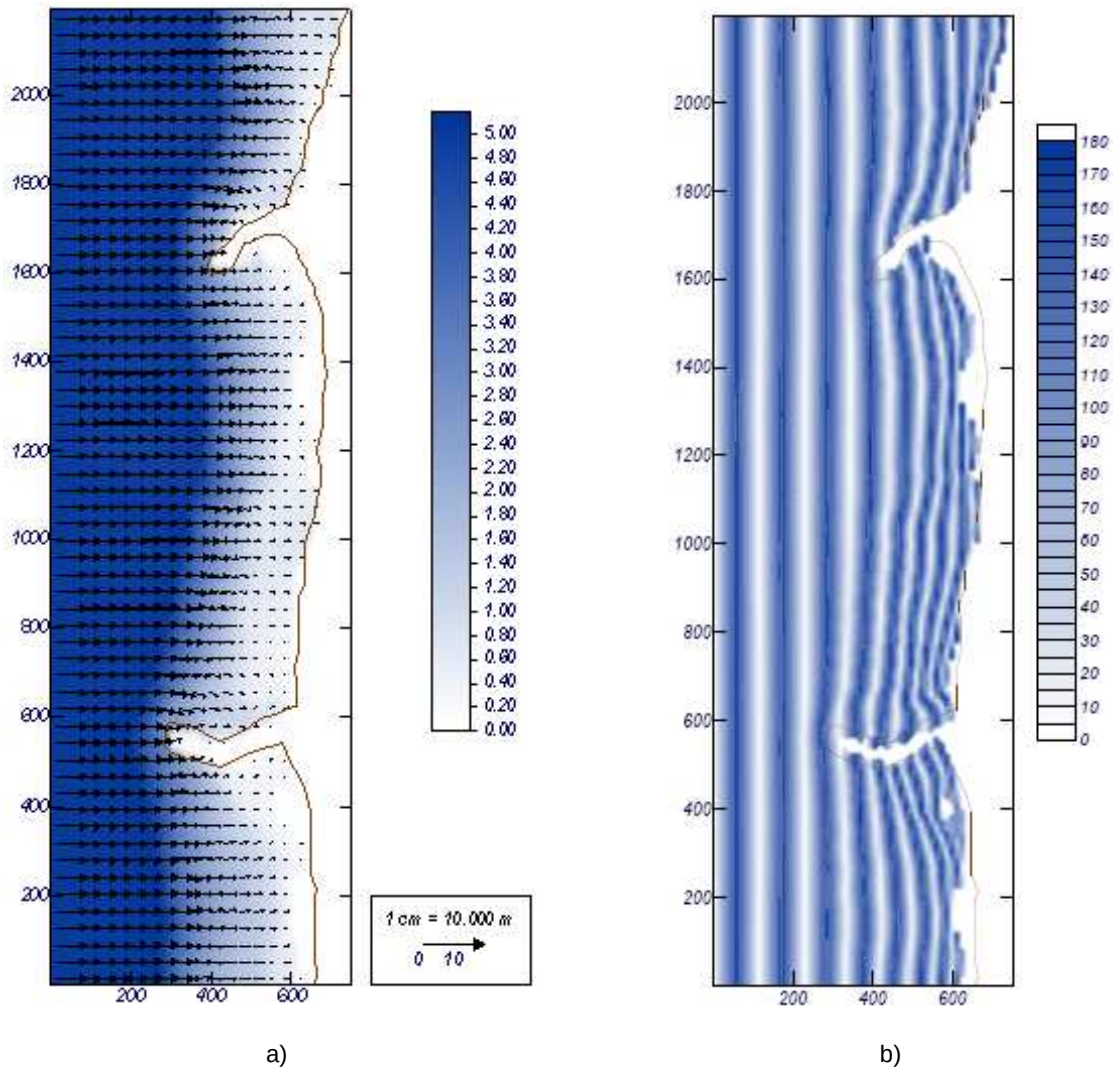


Figura A14 - a) Vectors agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

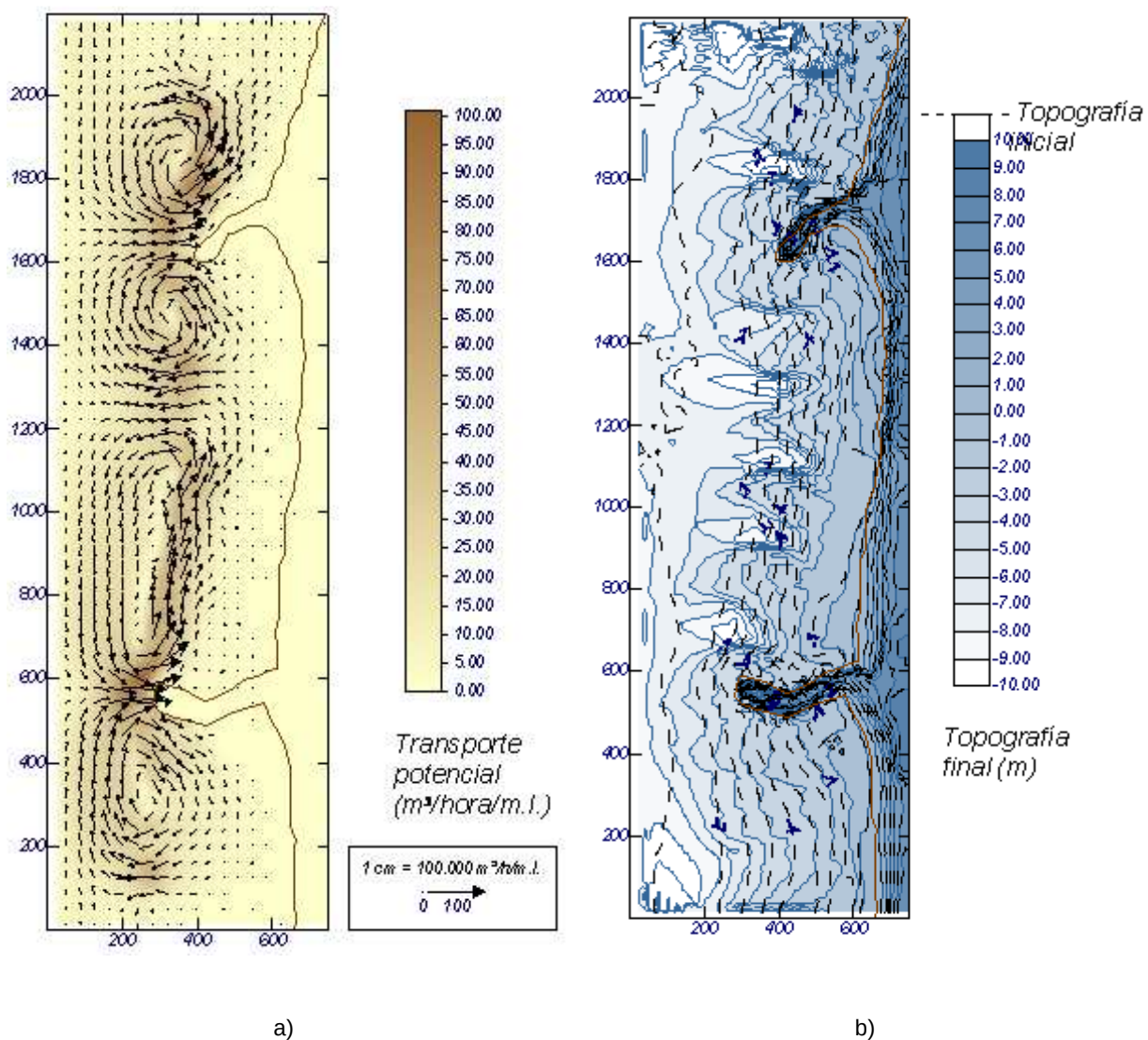


Figura A15 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

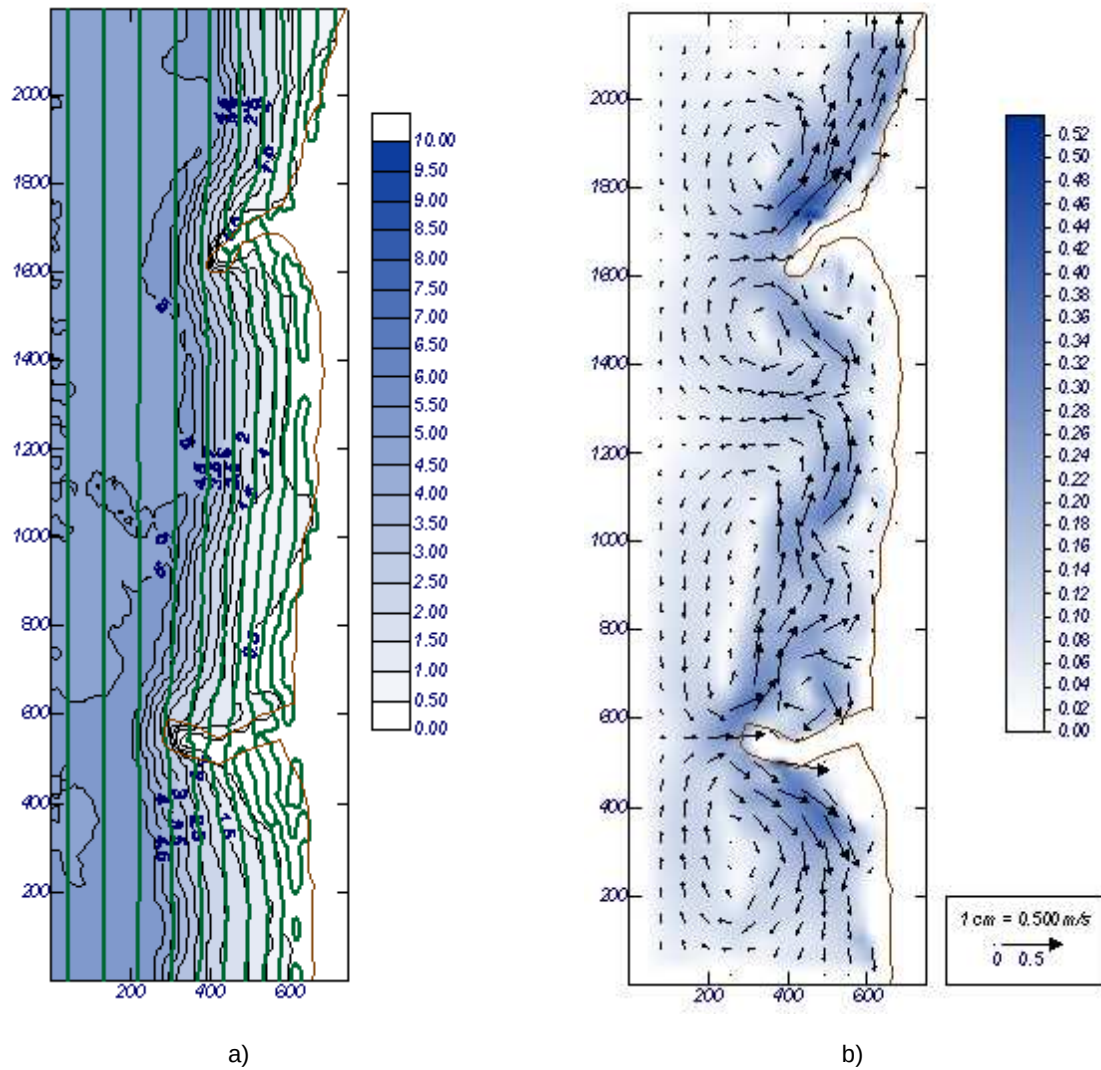


Figura A16 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectors corrente-magnitude, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

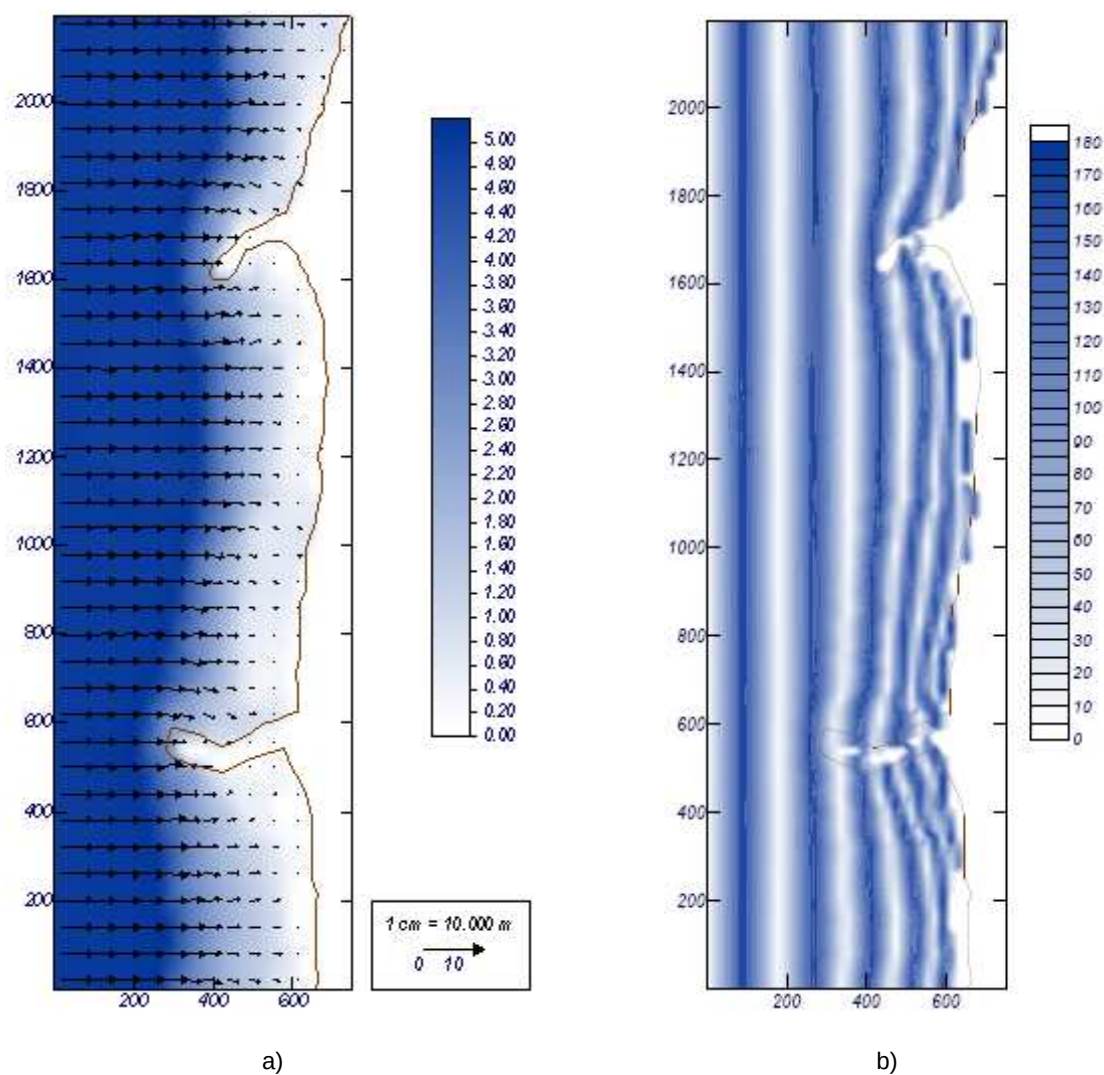


Figura A17 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

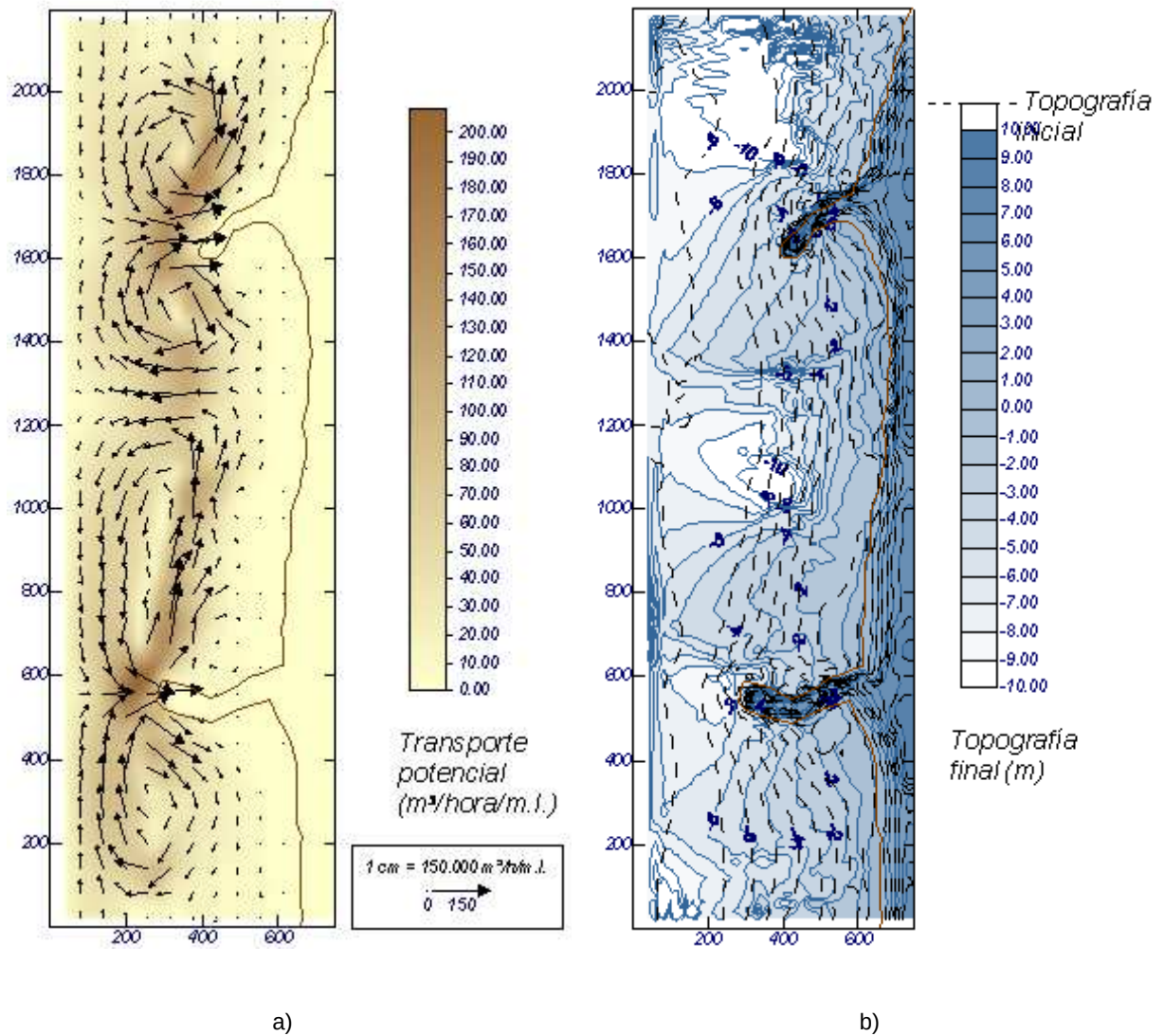


Figura A18 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

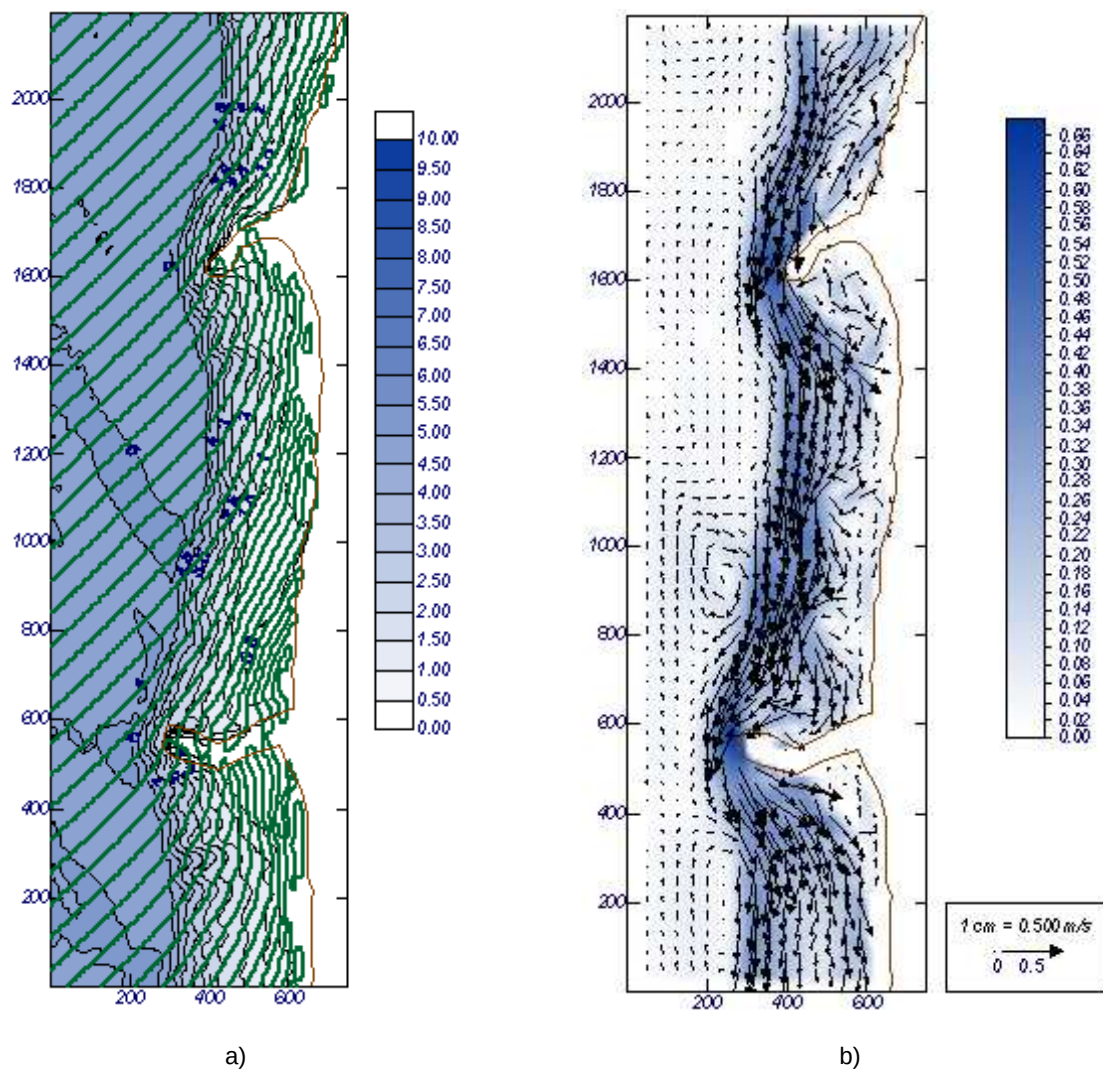


Figura A19 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectors corrente-magnitude, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

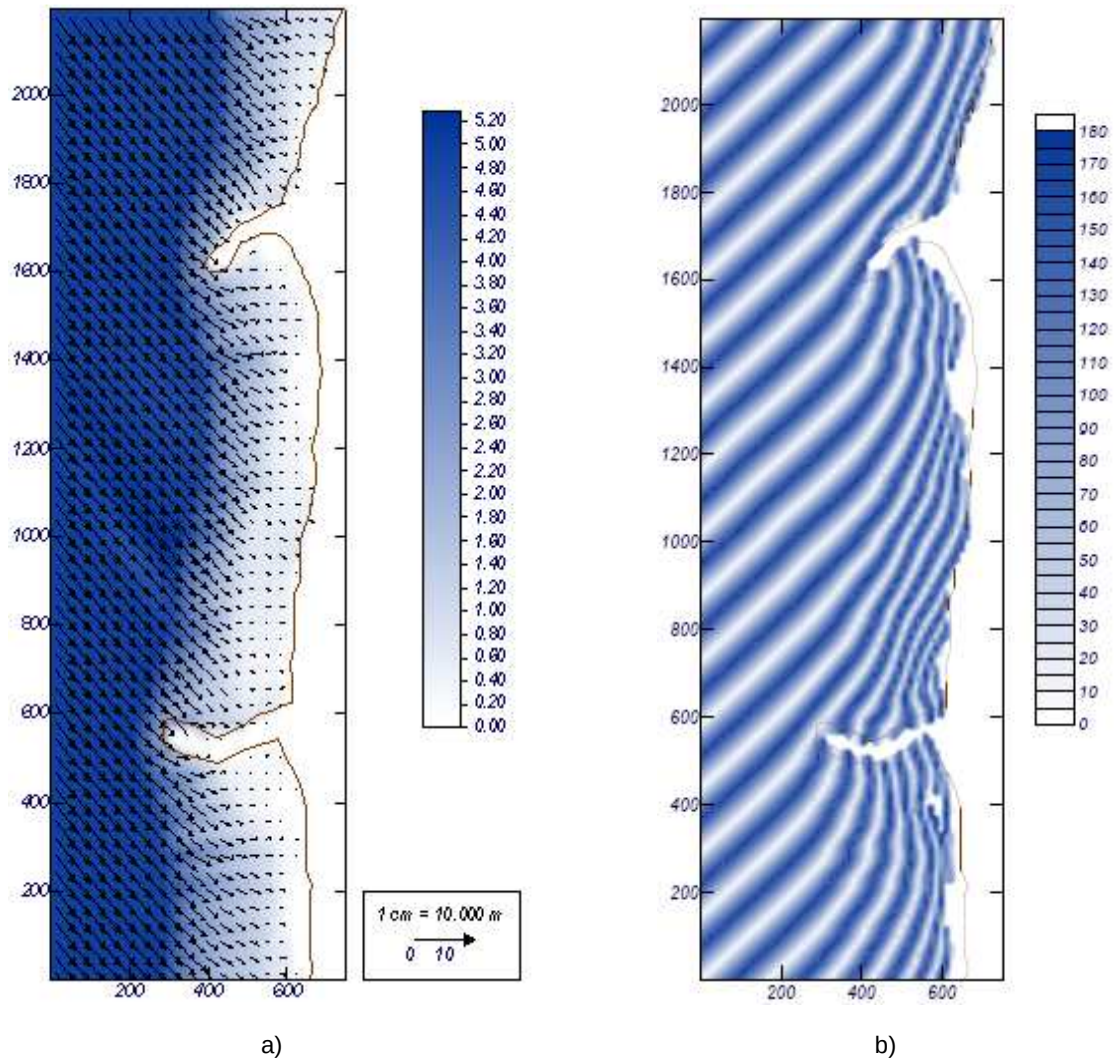


Figura A20 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

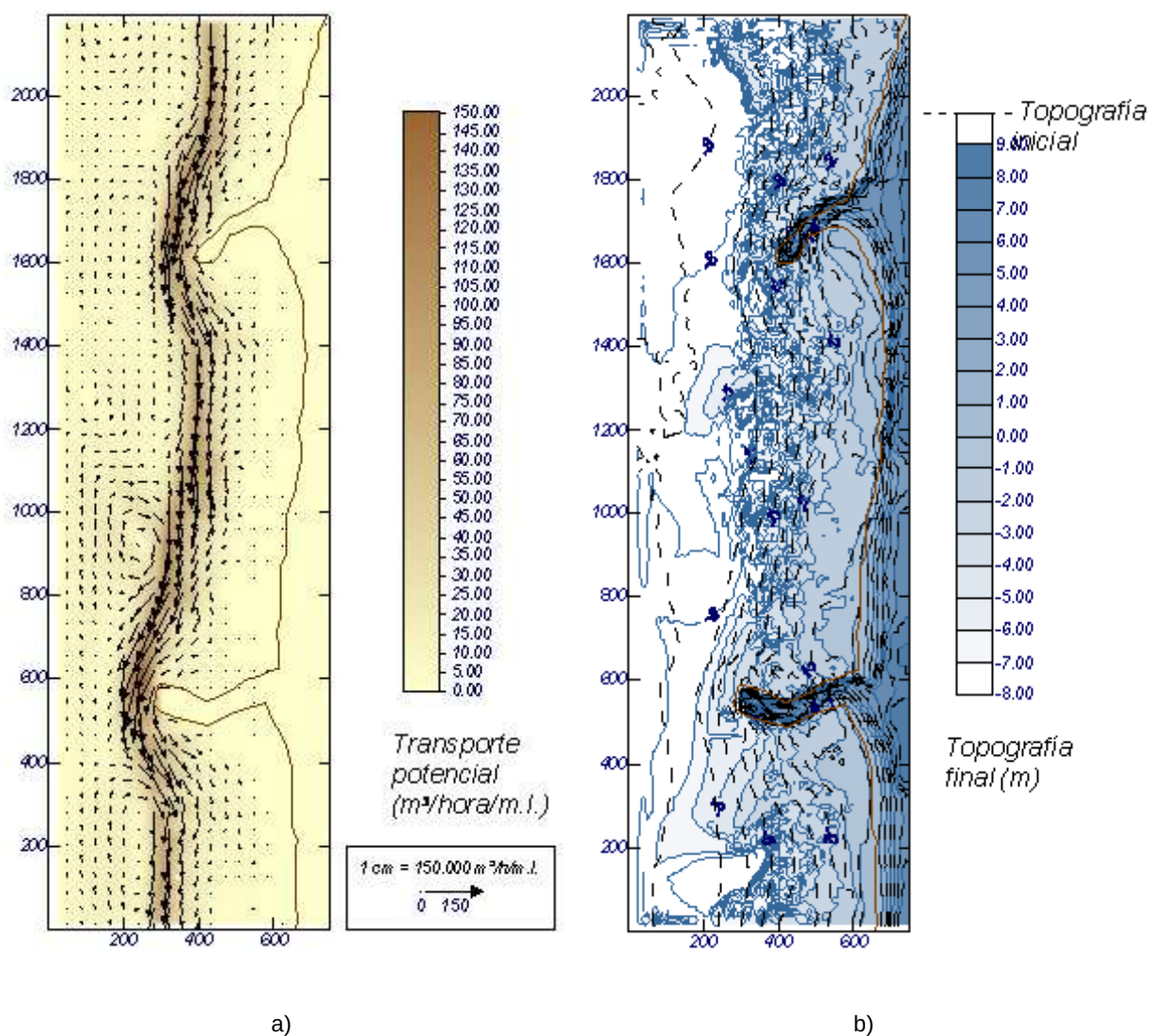


Figura A21 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

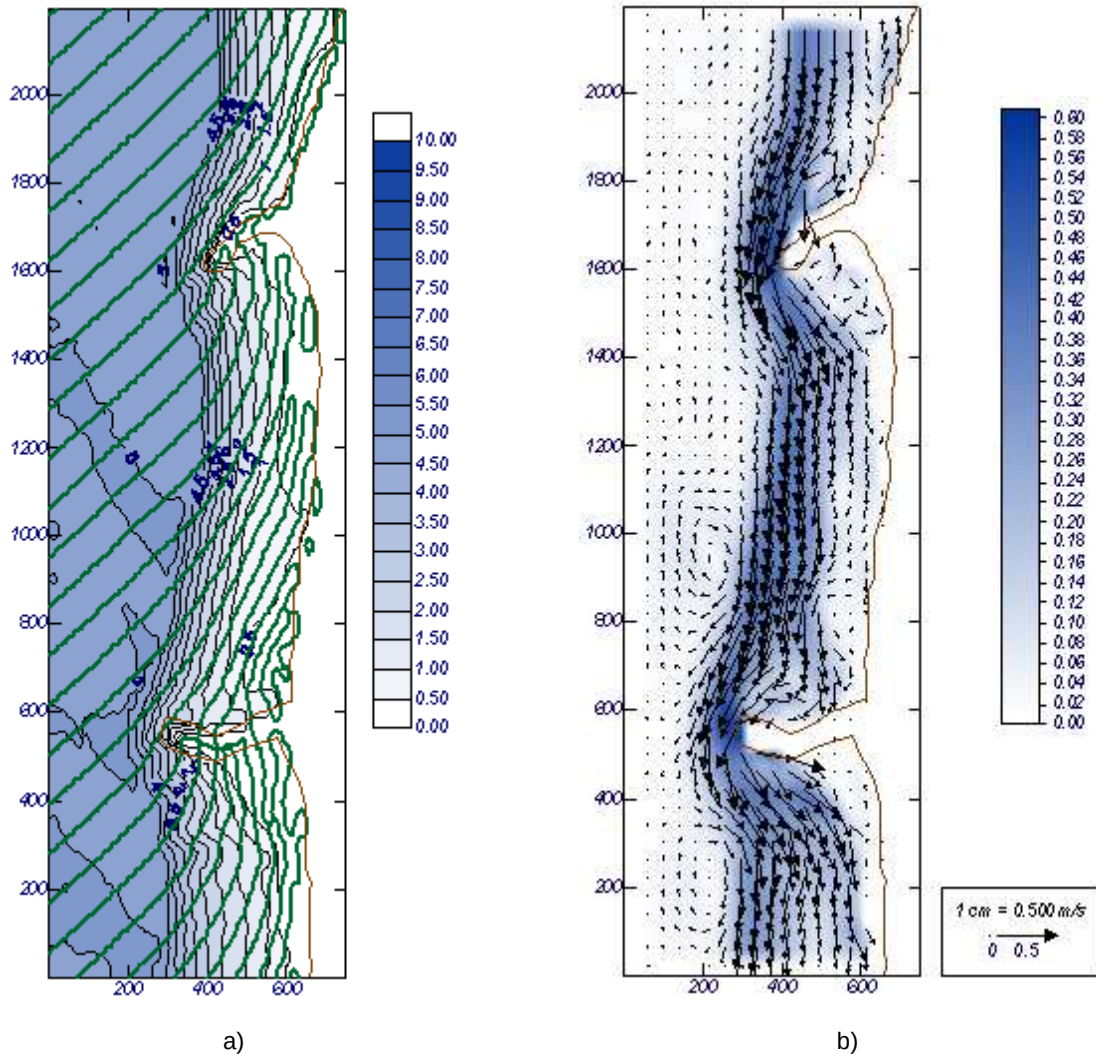


Figura A22 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de noroeste.

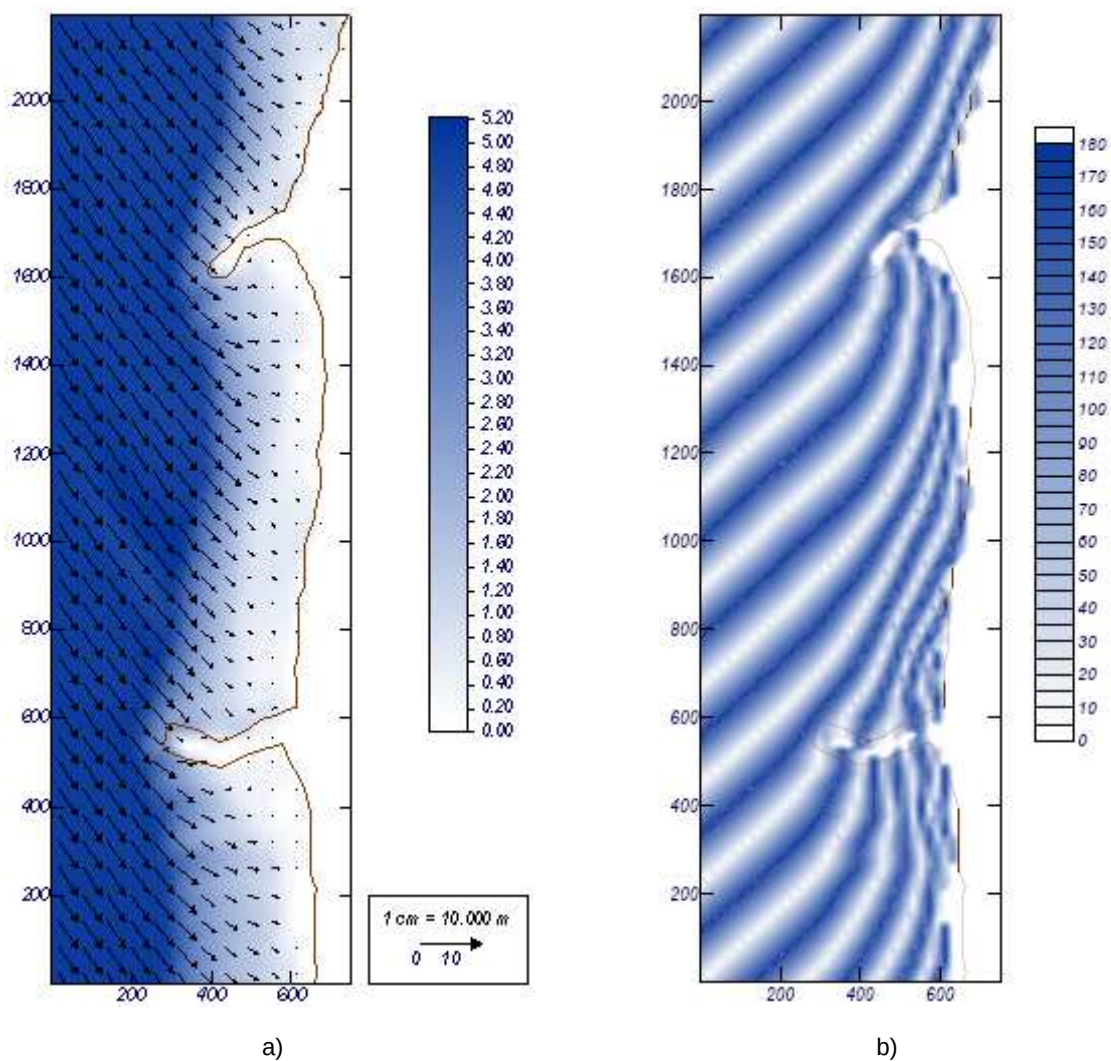


Figura A23 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de noroeste.

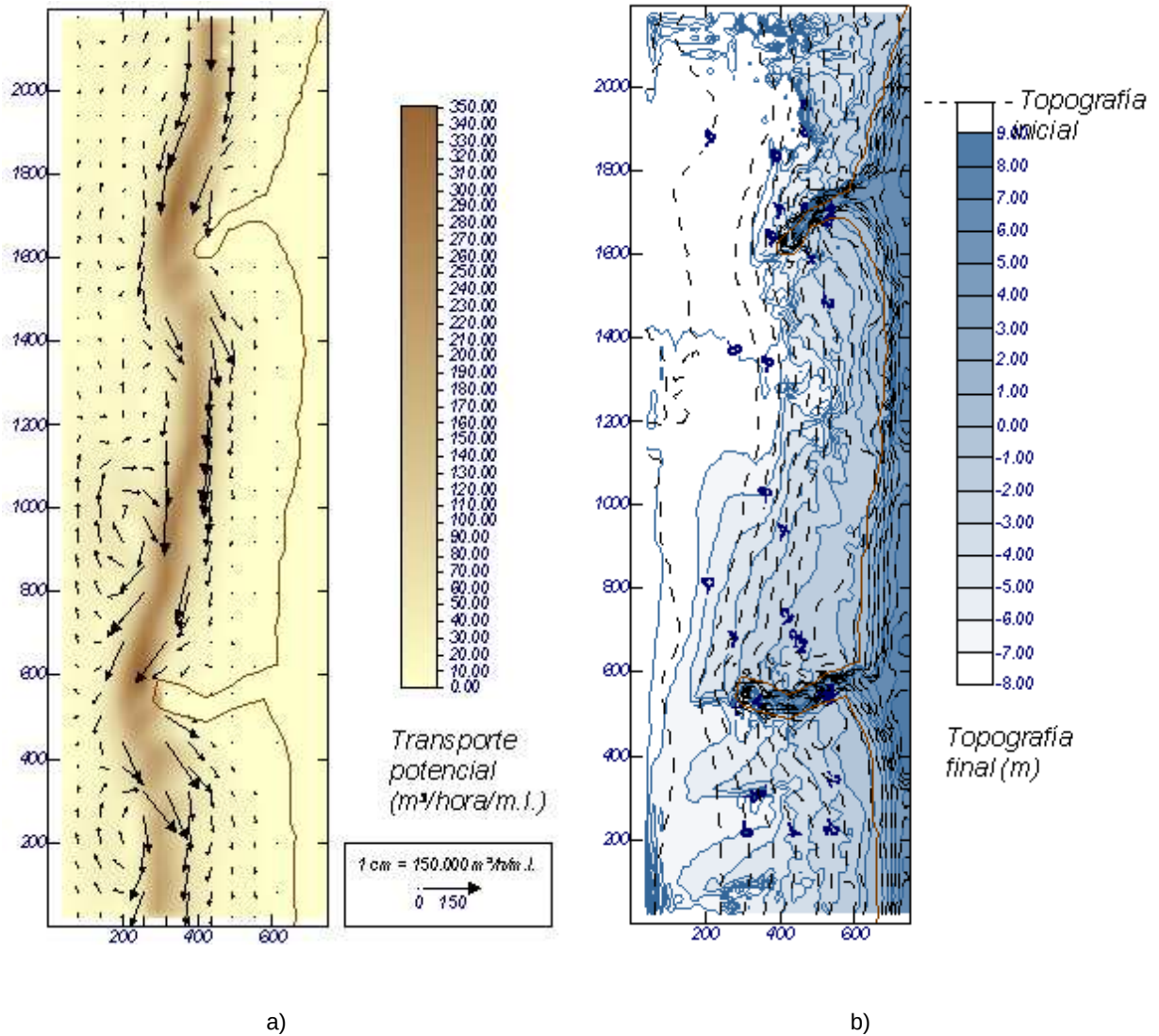


Figura A24 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de noroeste.

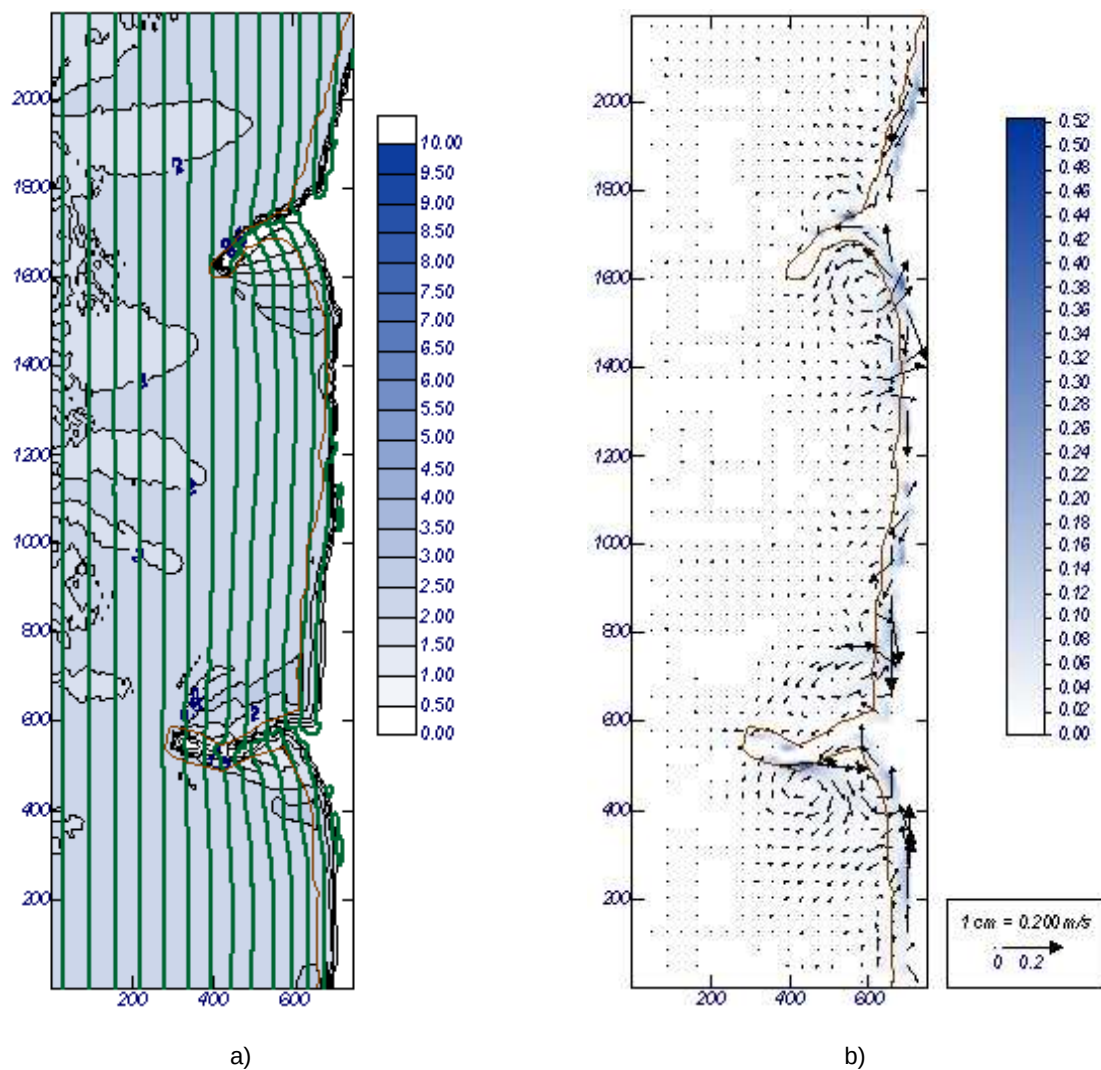


Figura A25 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

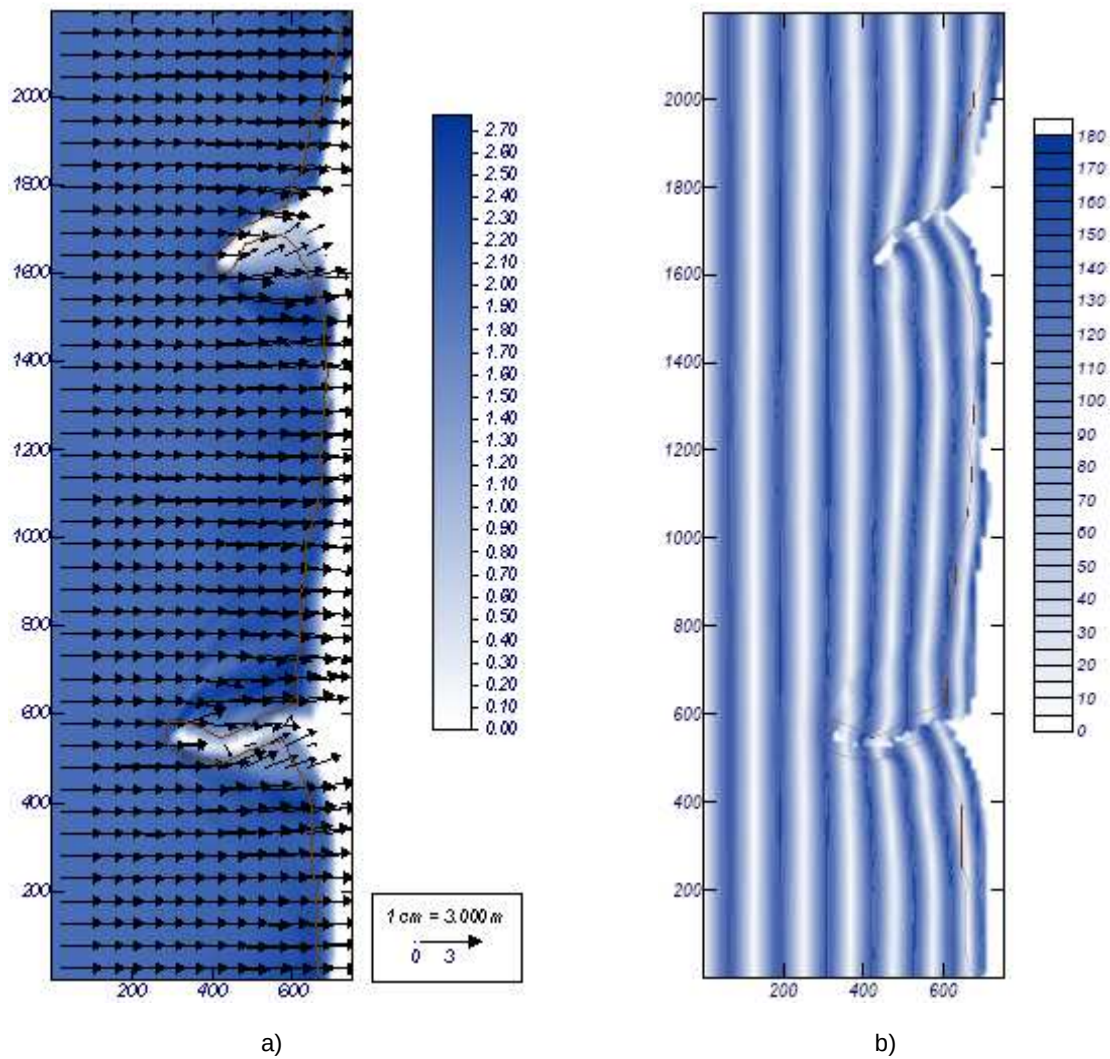


Figura A26 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

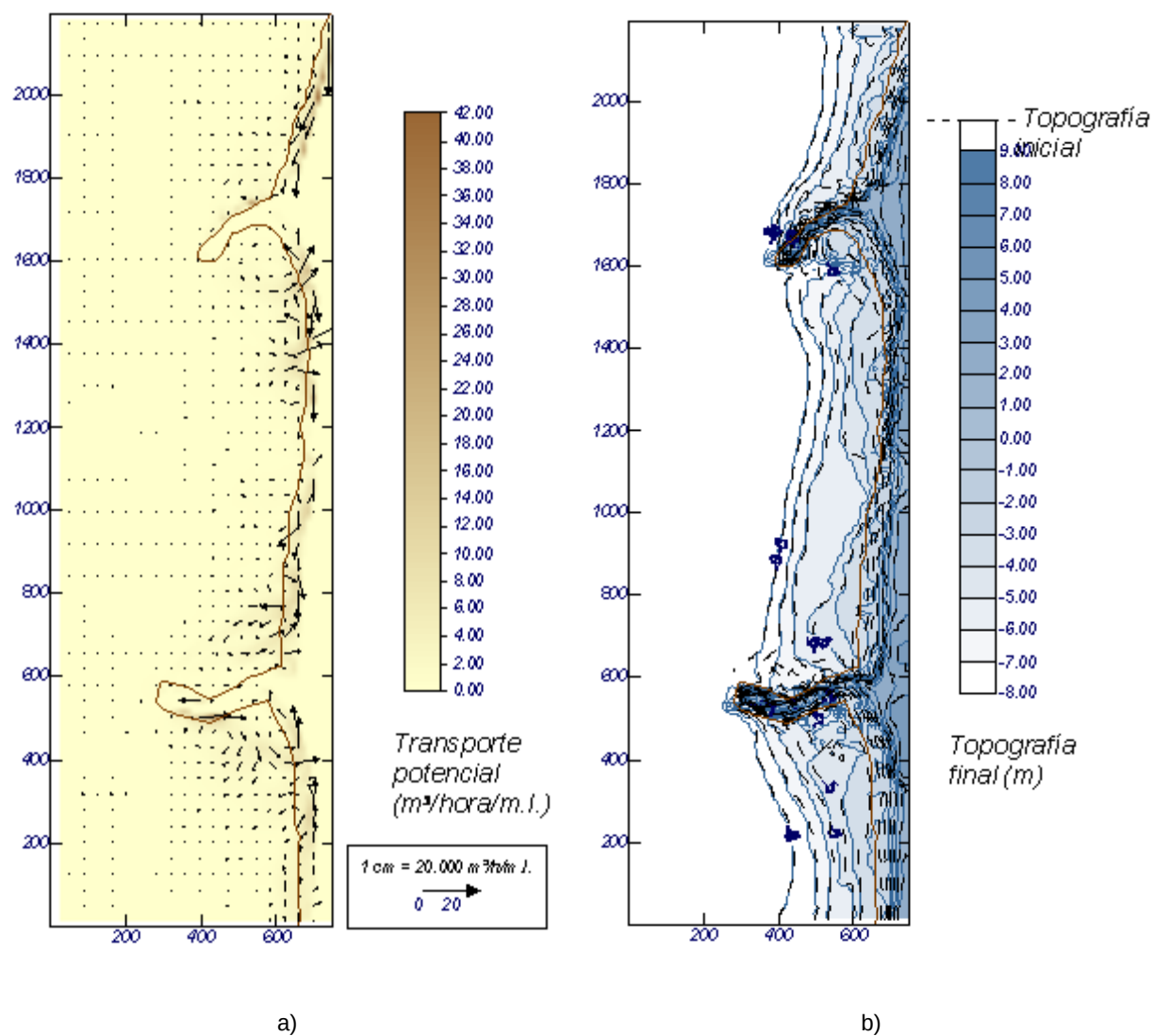


Figura A27 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

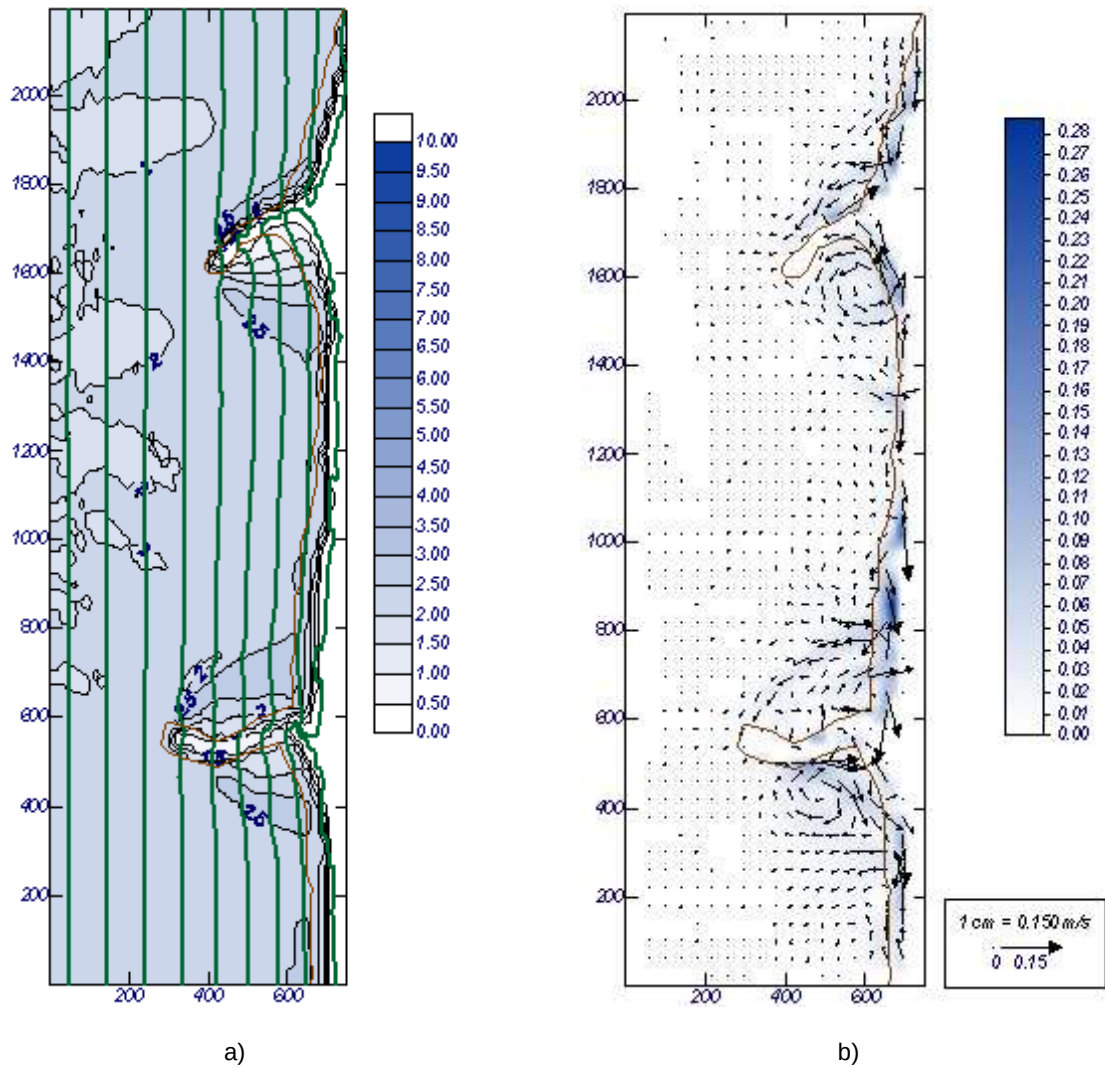


Figura A28 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

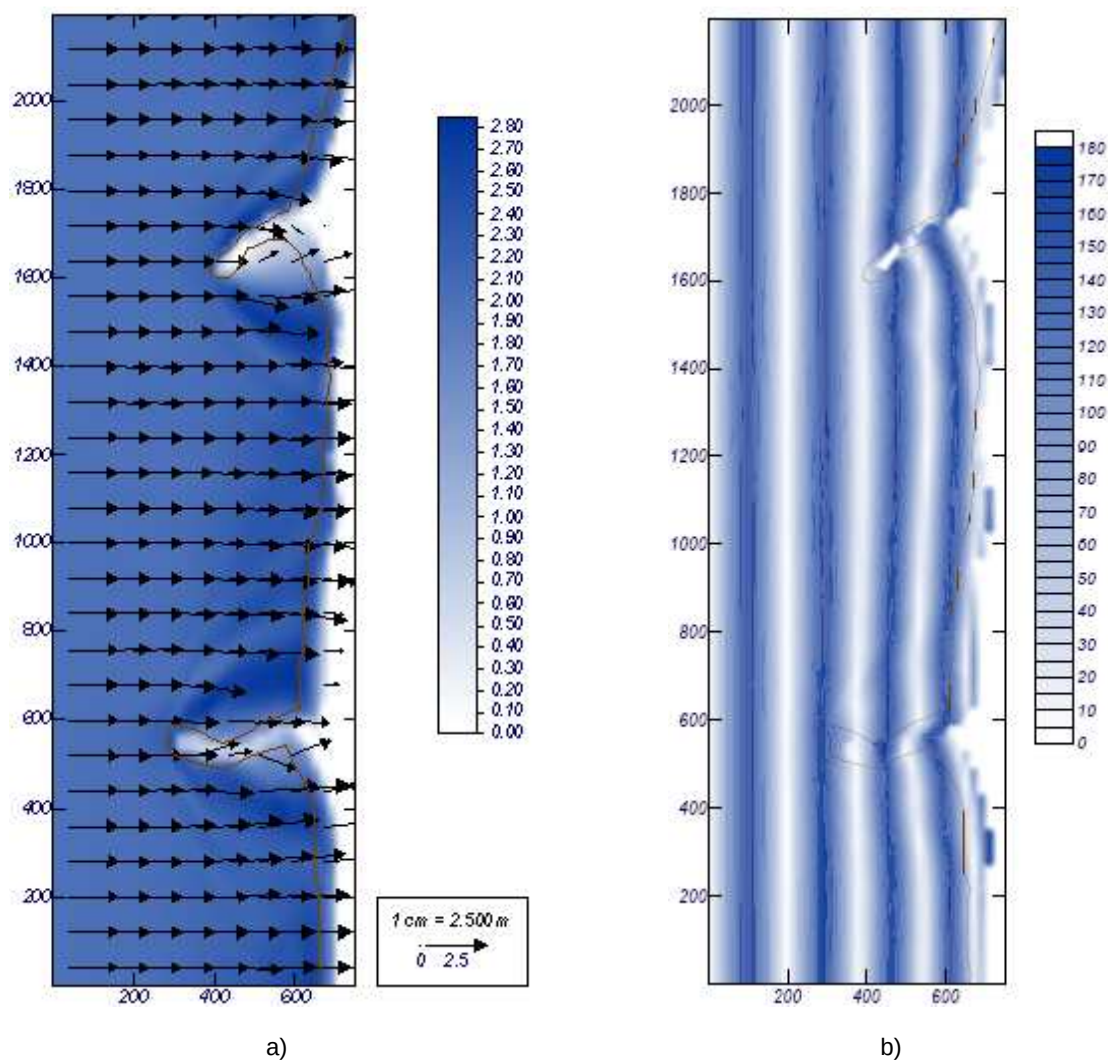


Figura A29 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

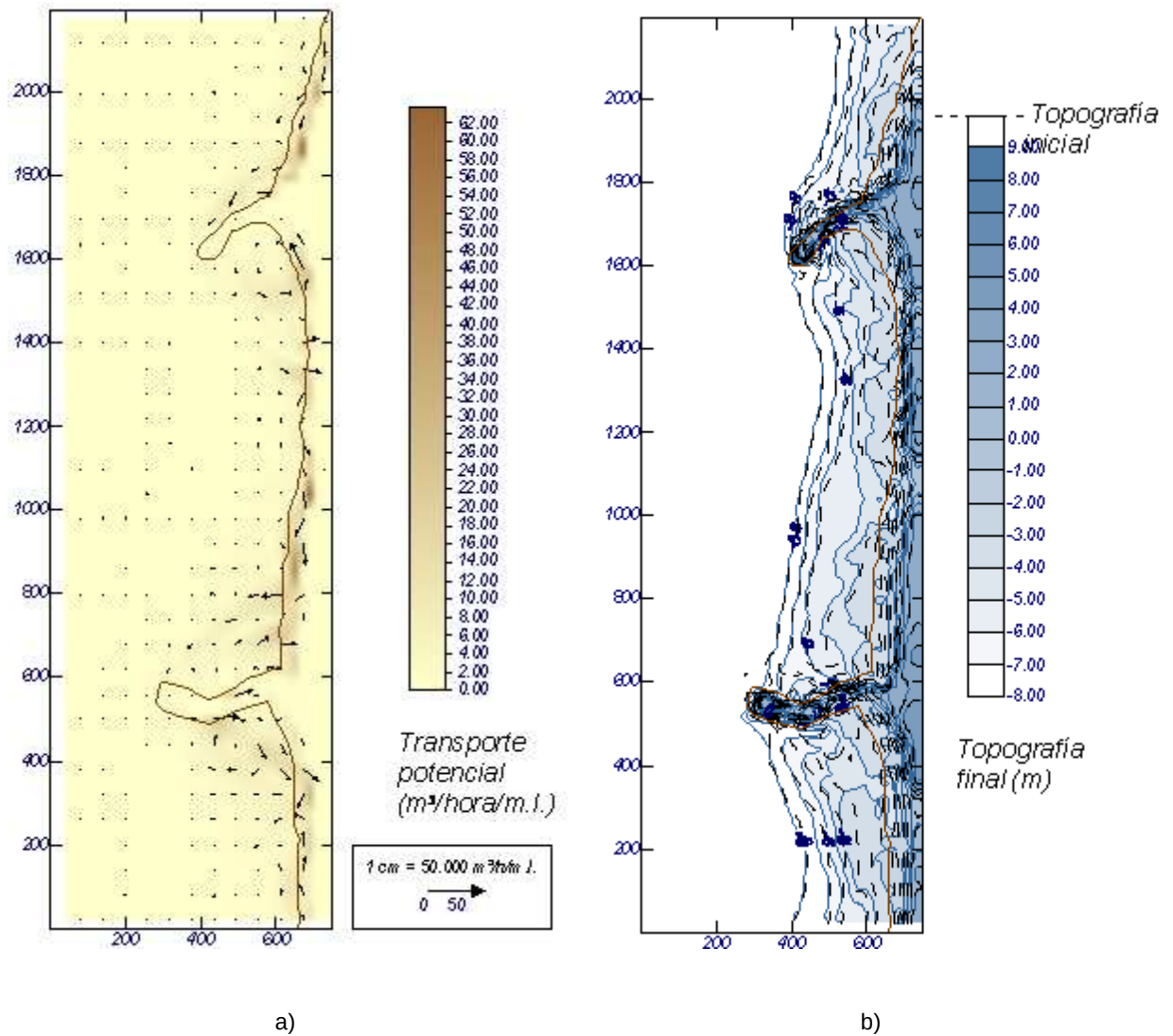


Figura A30 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

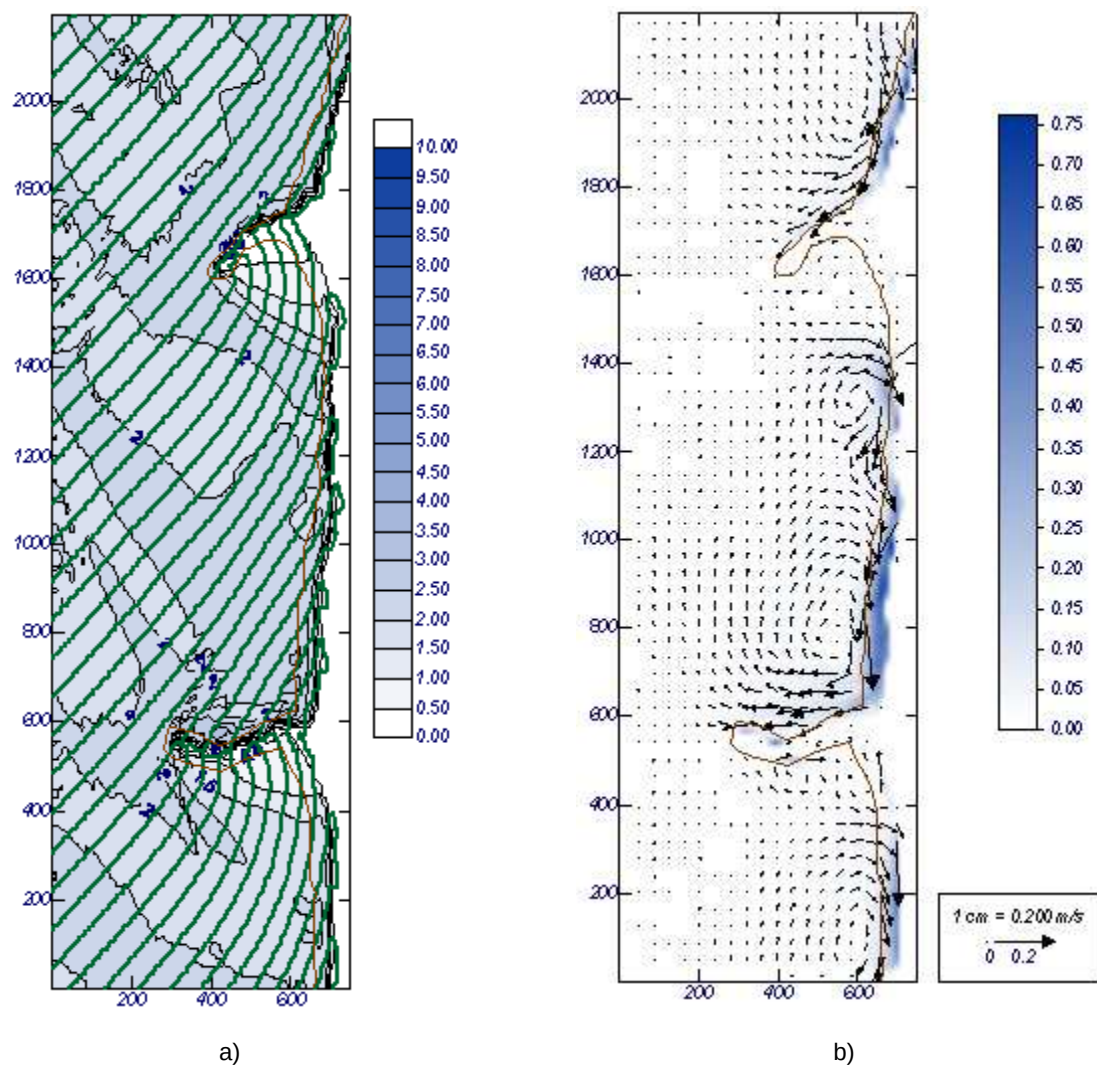


Figura A31 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

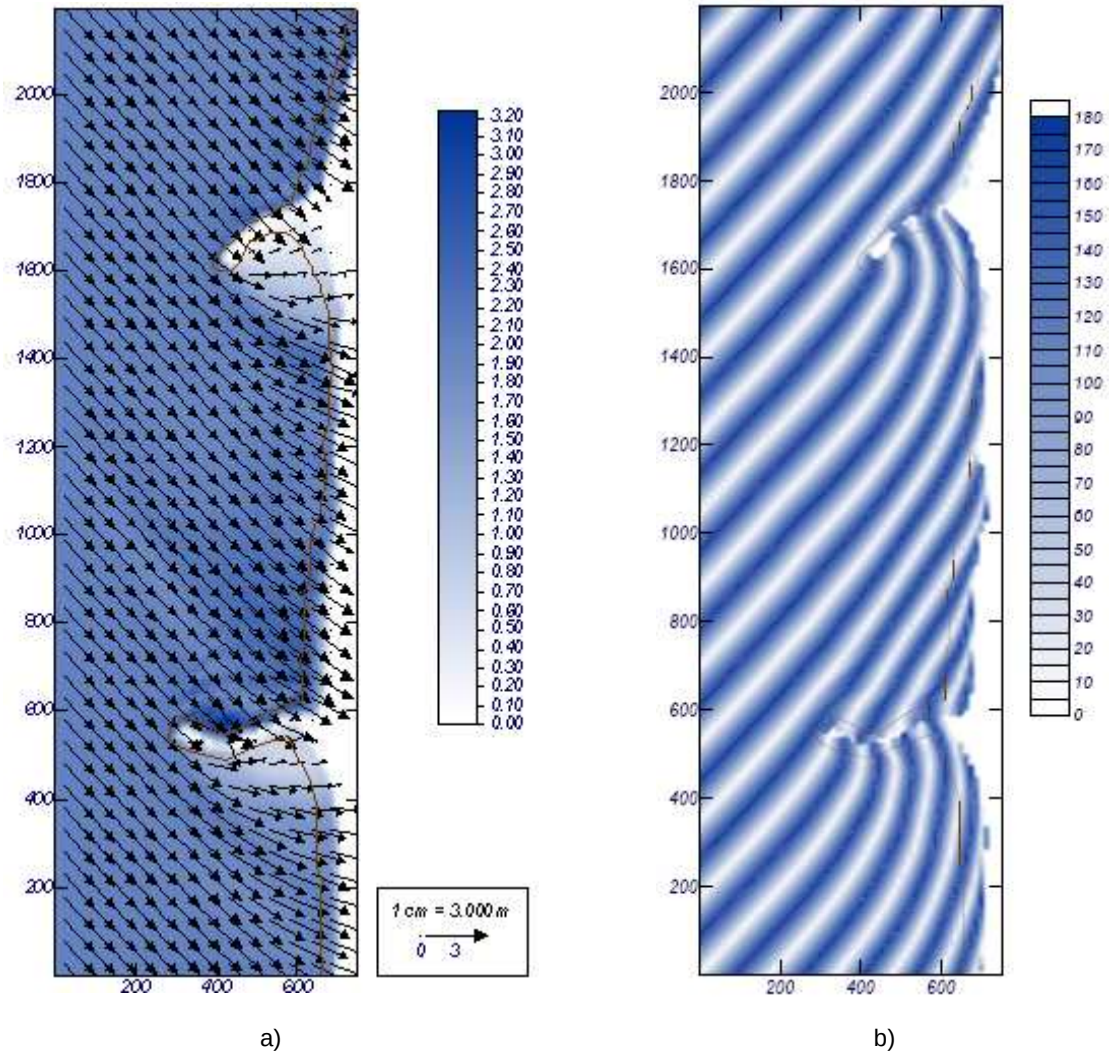


Figura A32 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

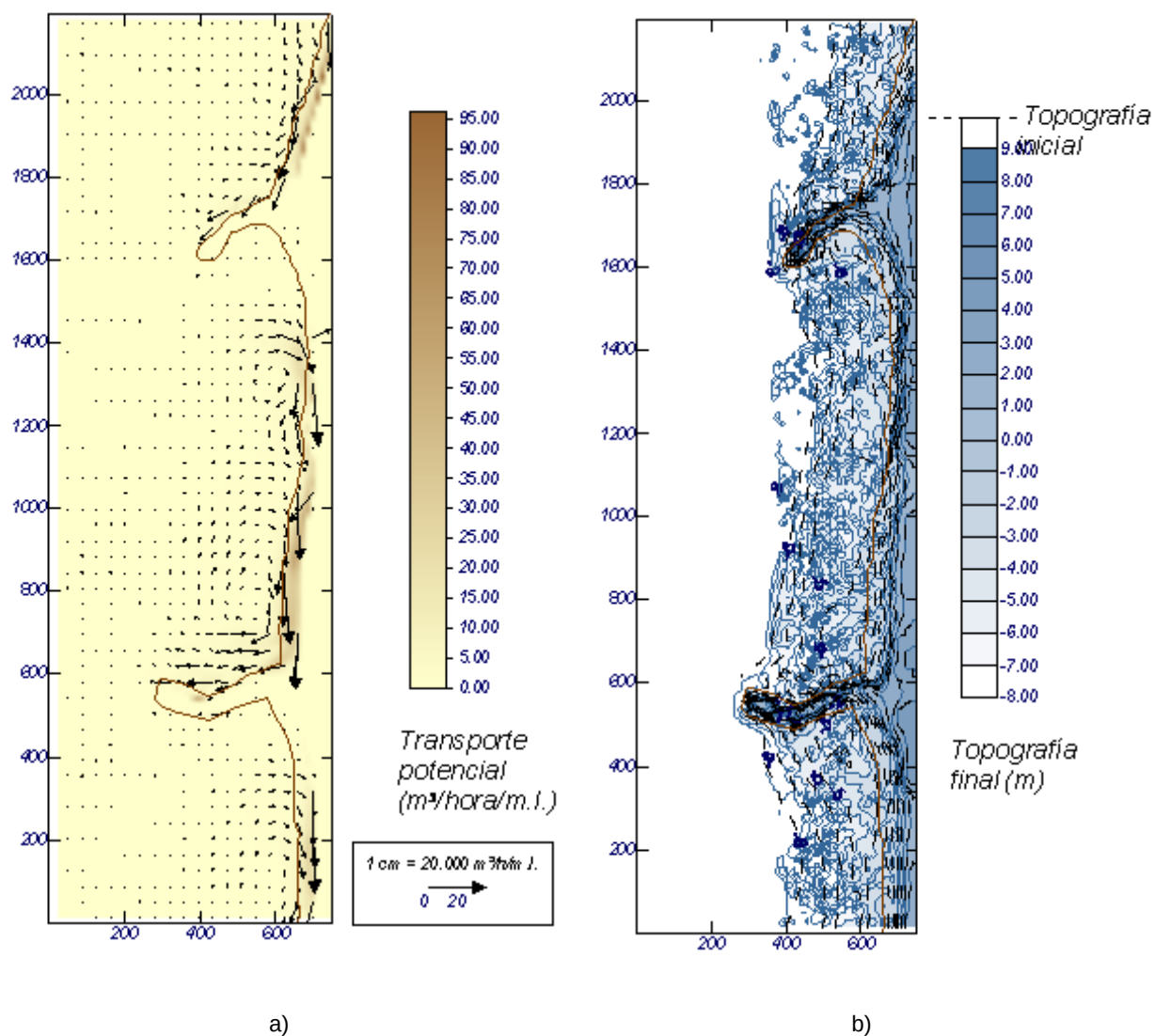


Figura A33 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

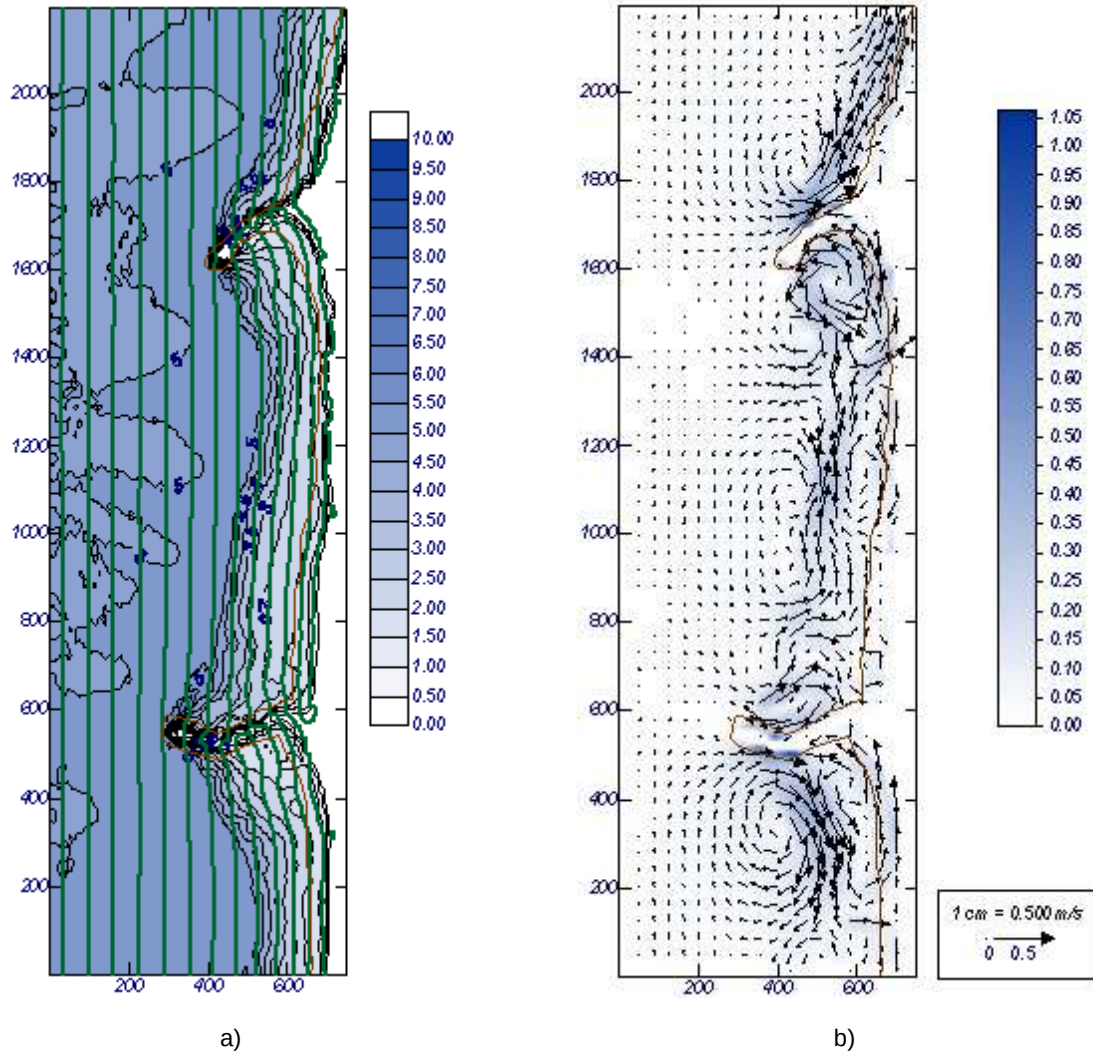


Figura A34 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

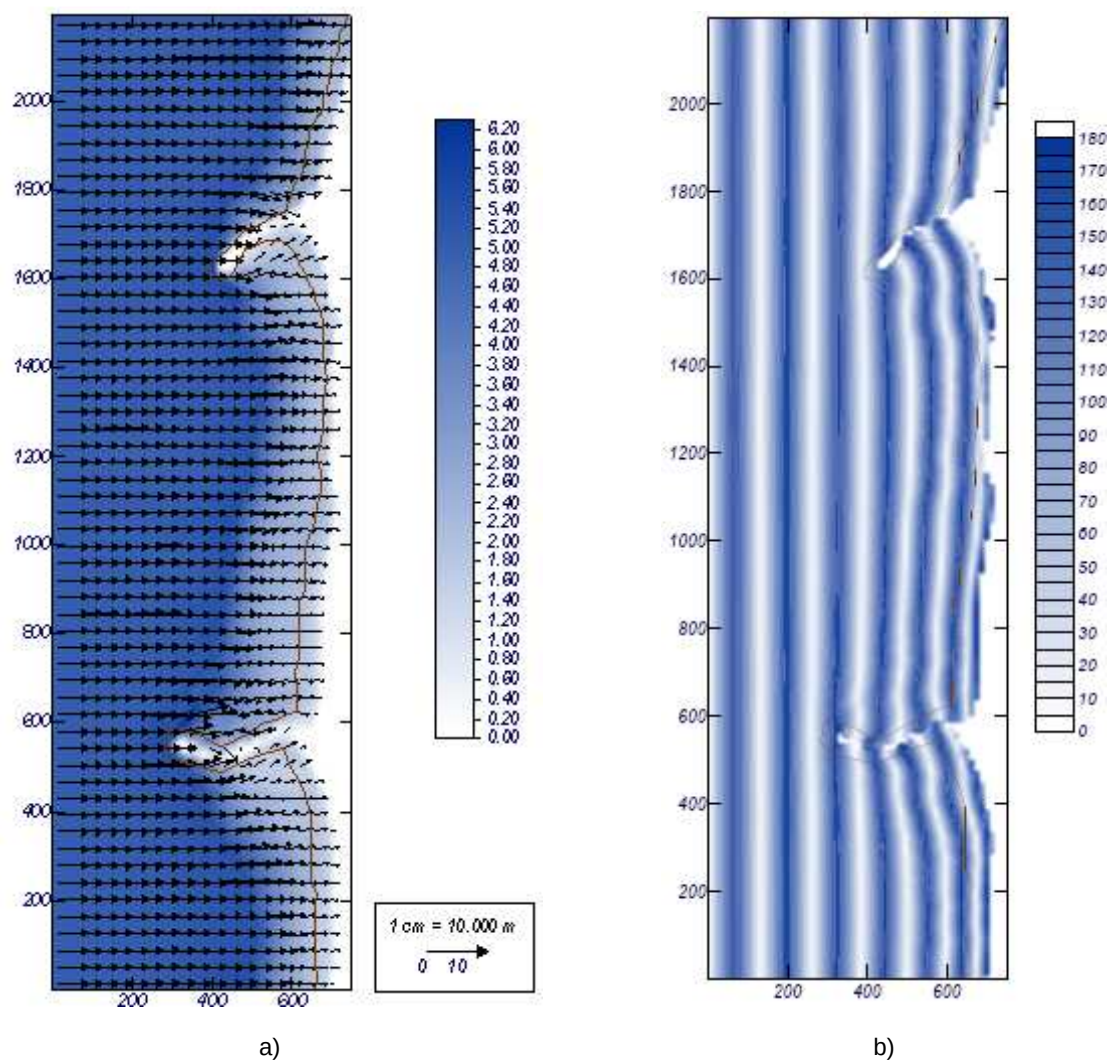


Figura A35 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

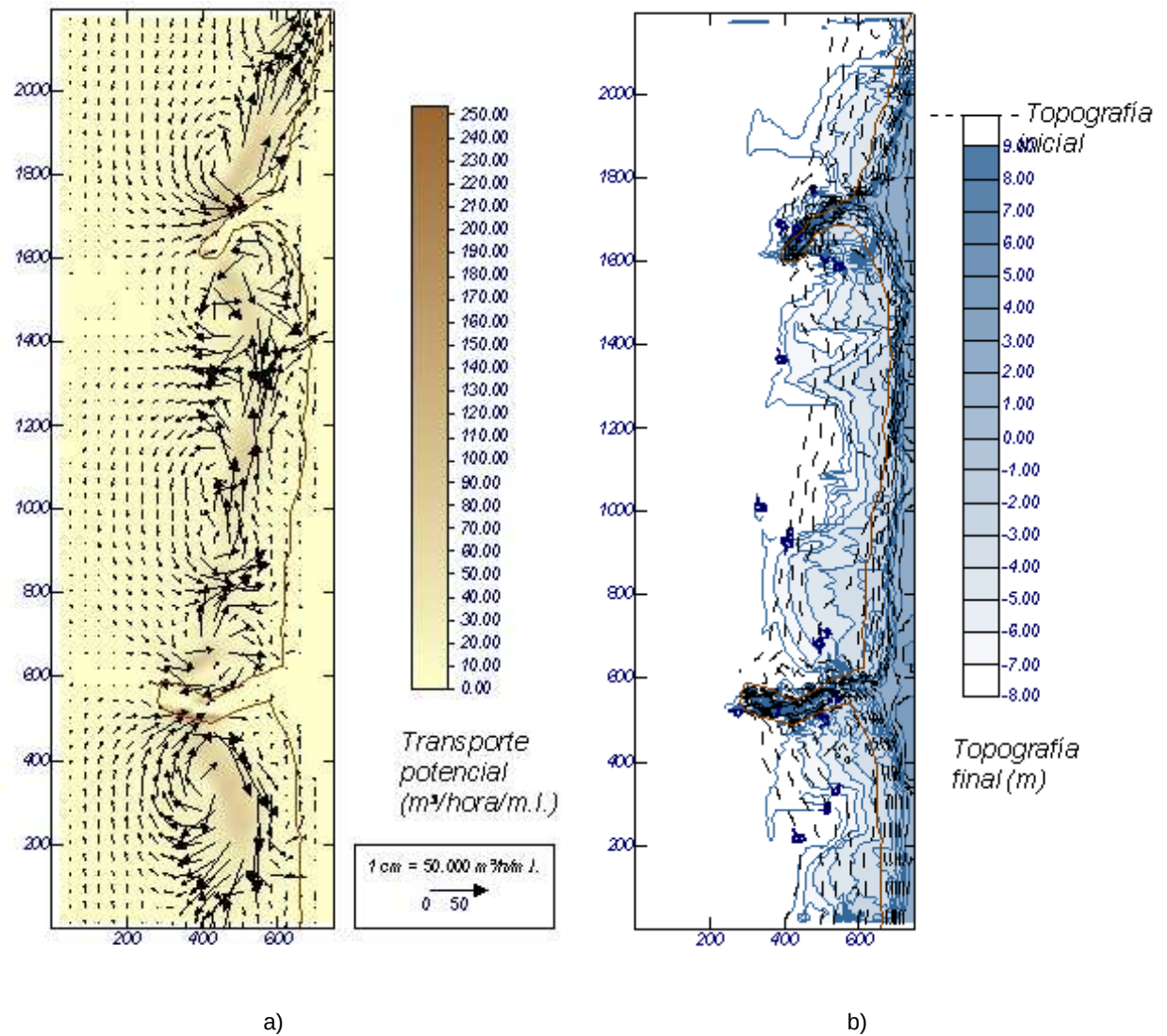


Figura A36 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

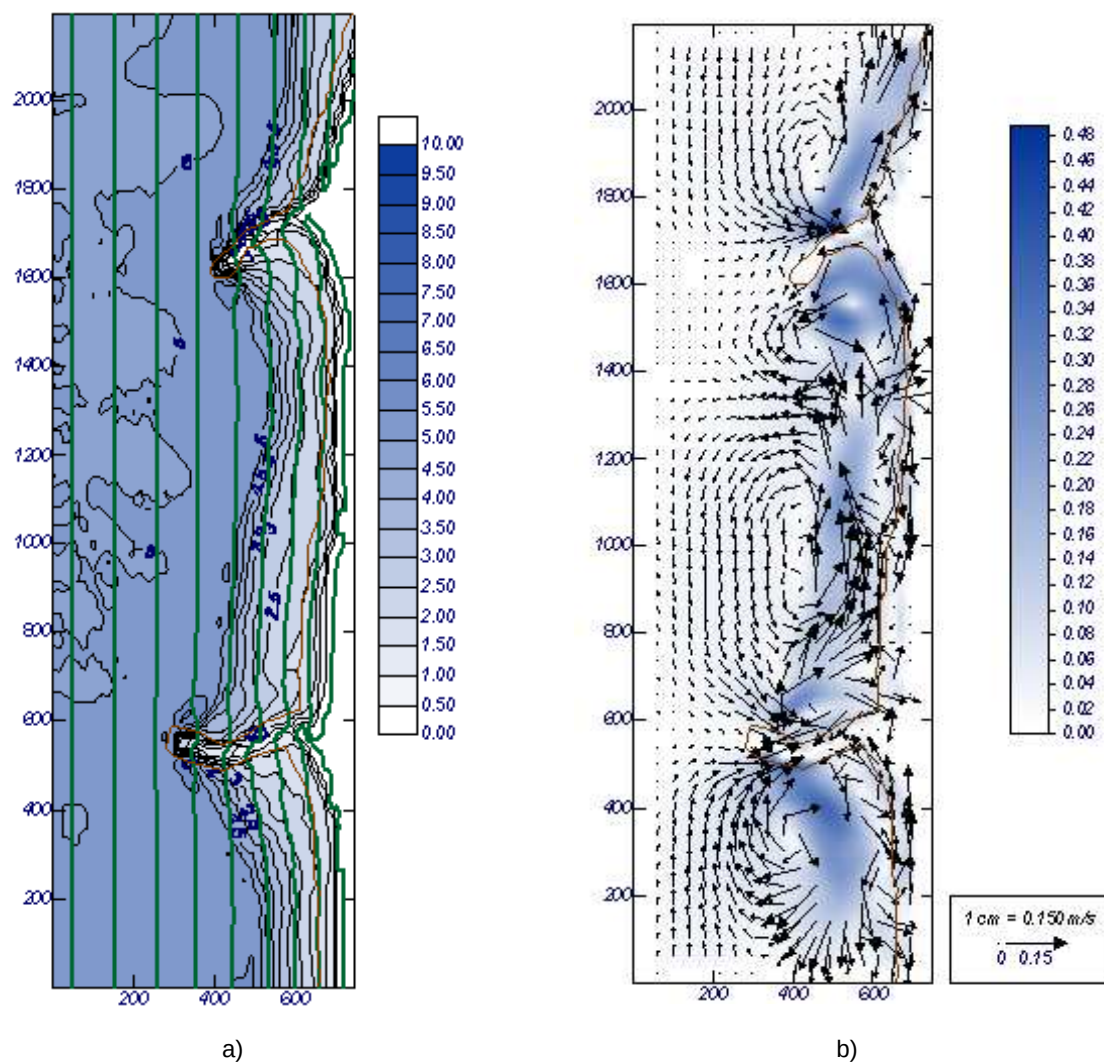


Figura A37 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

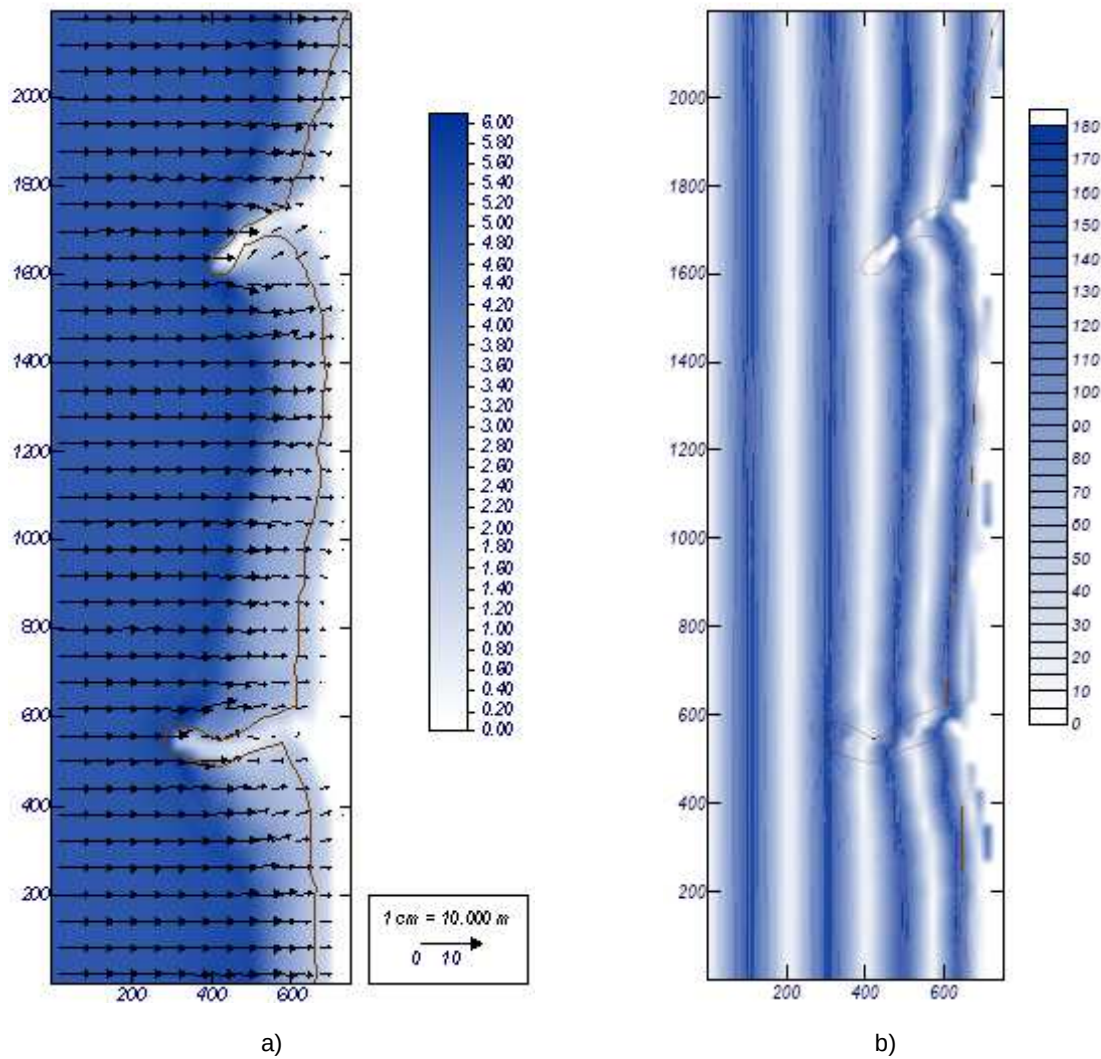


Figura A38 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

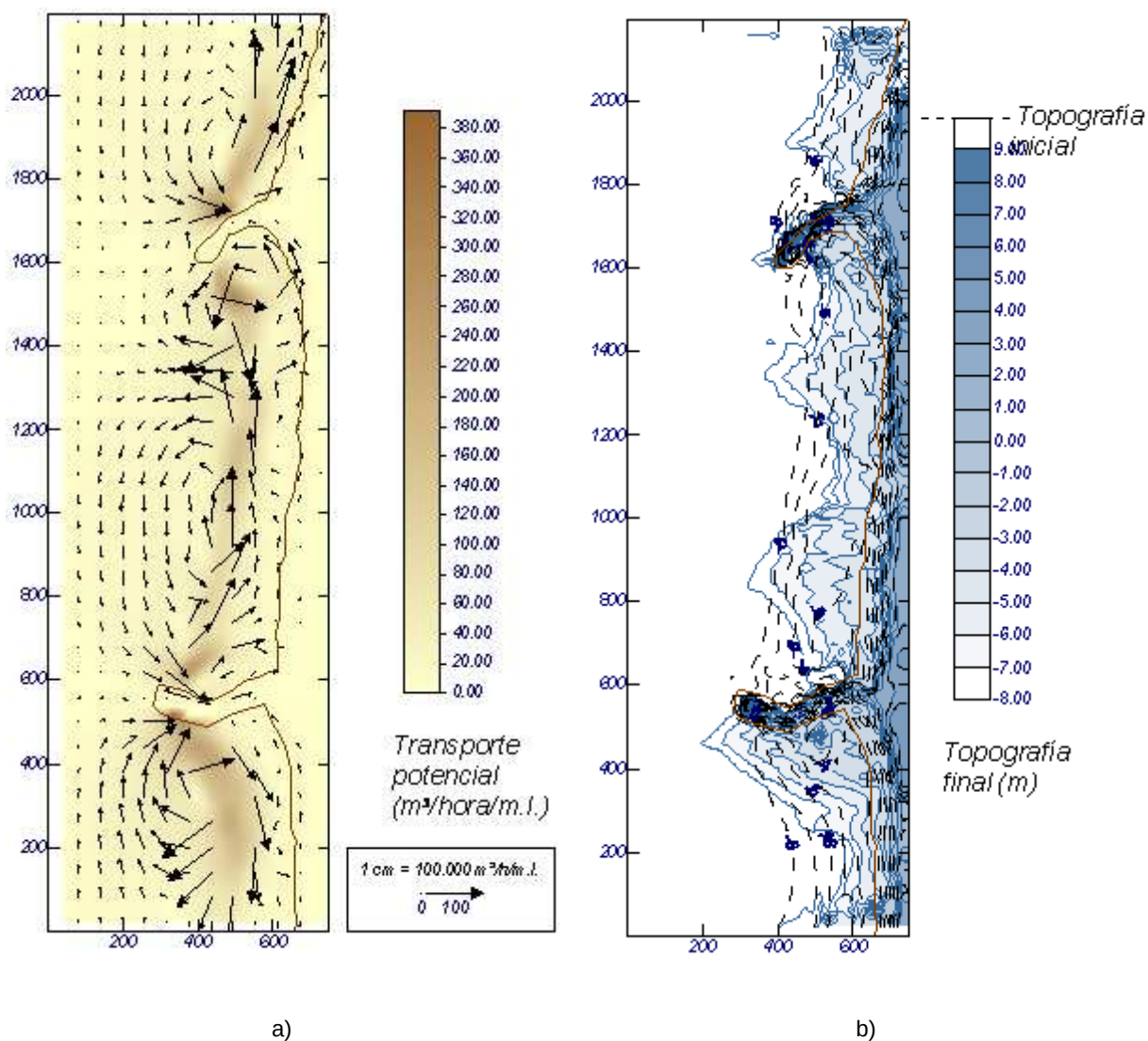


Figura A39 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

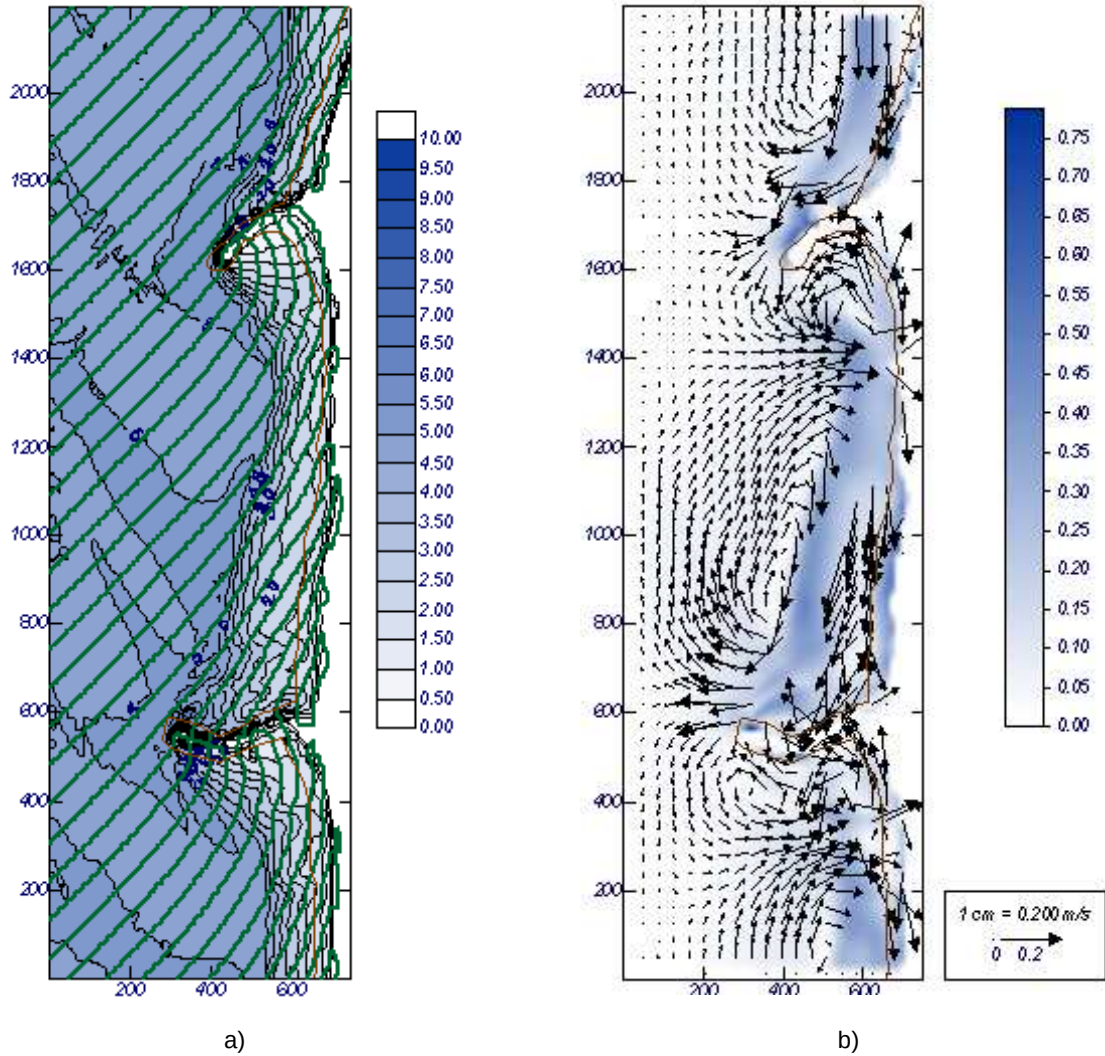


Figura A40 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectors corrente-magnitude, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

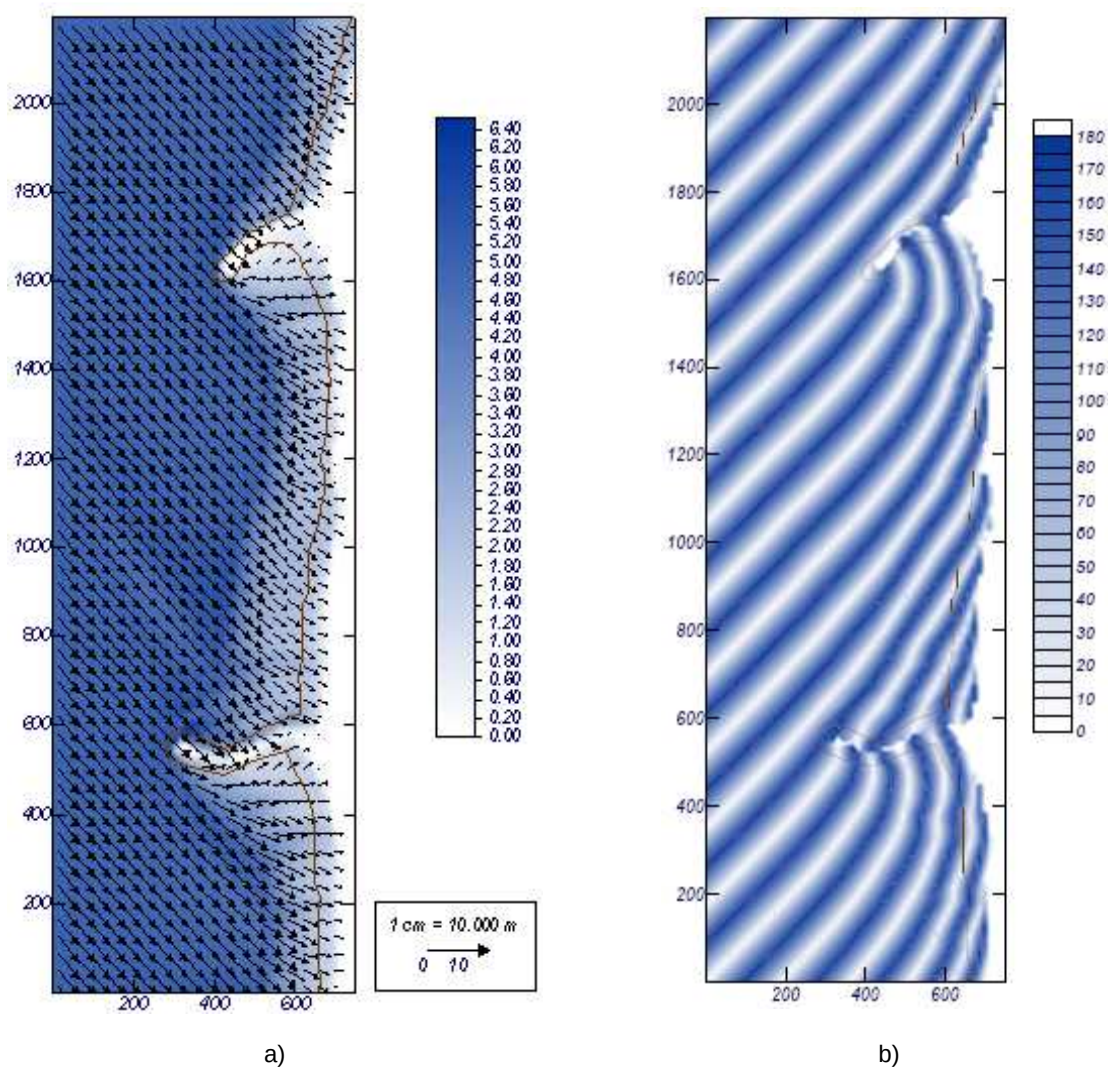


Figura A41 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

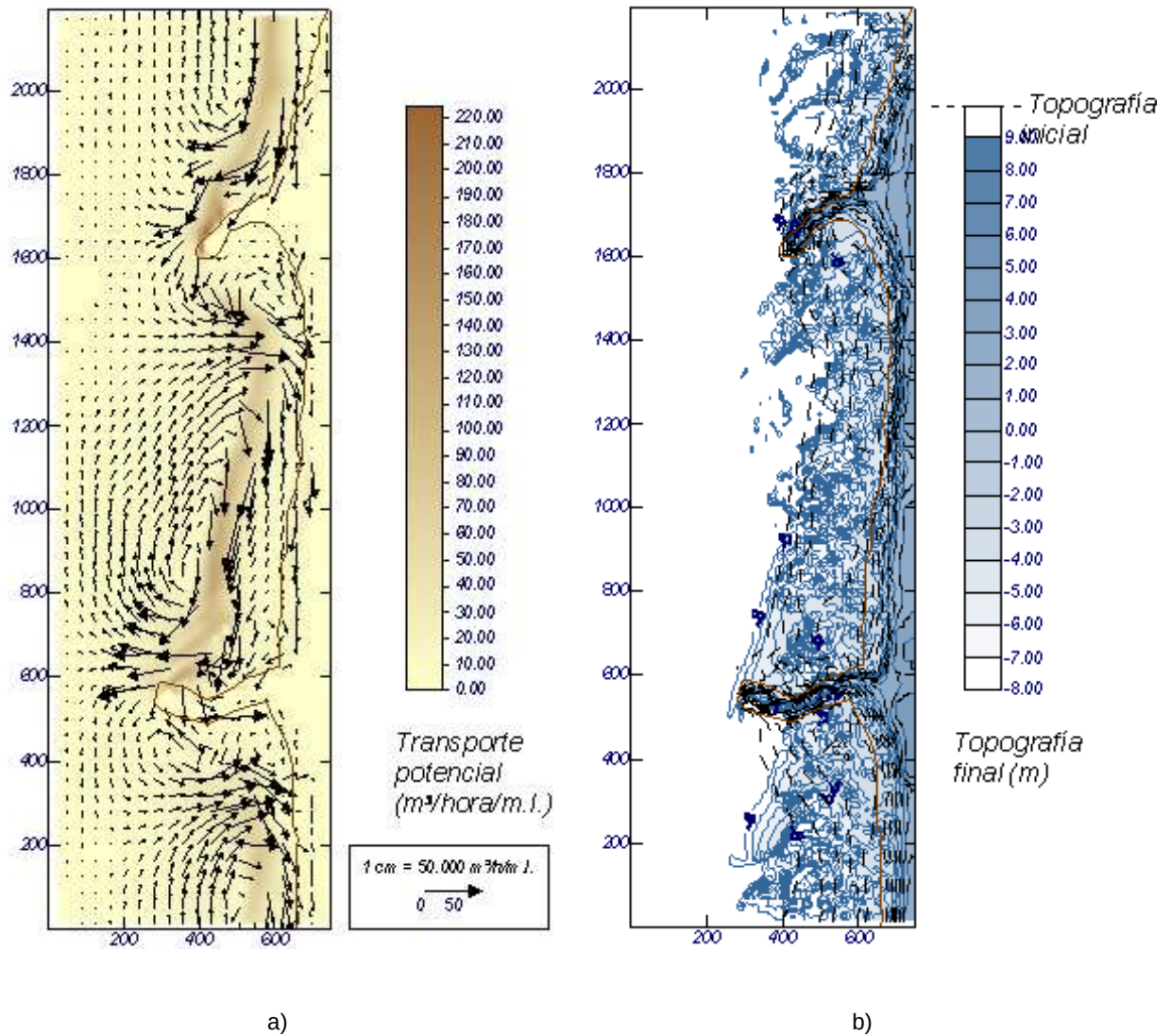


Figura A42 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

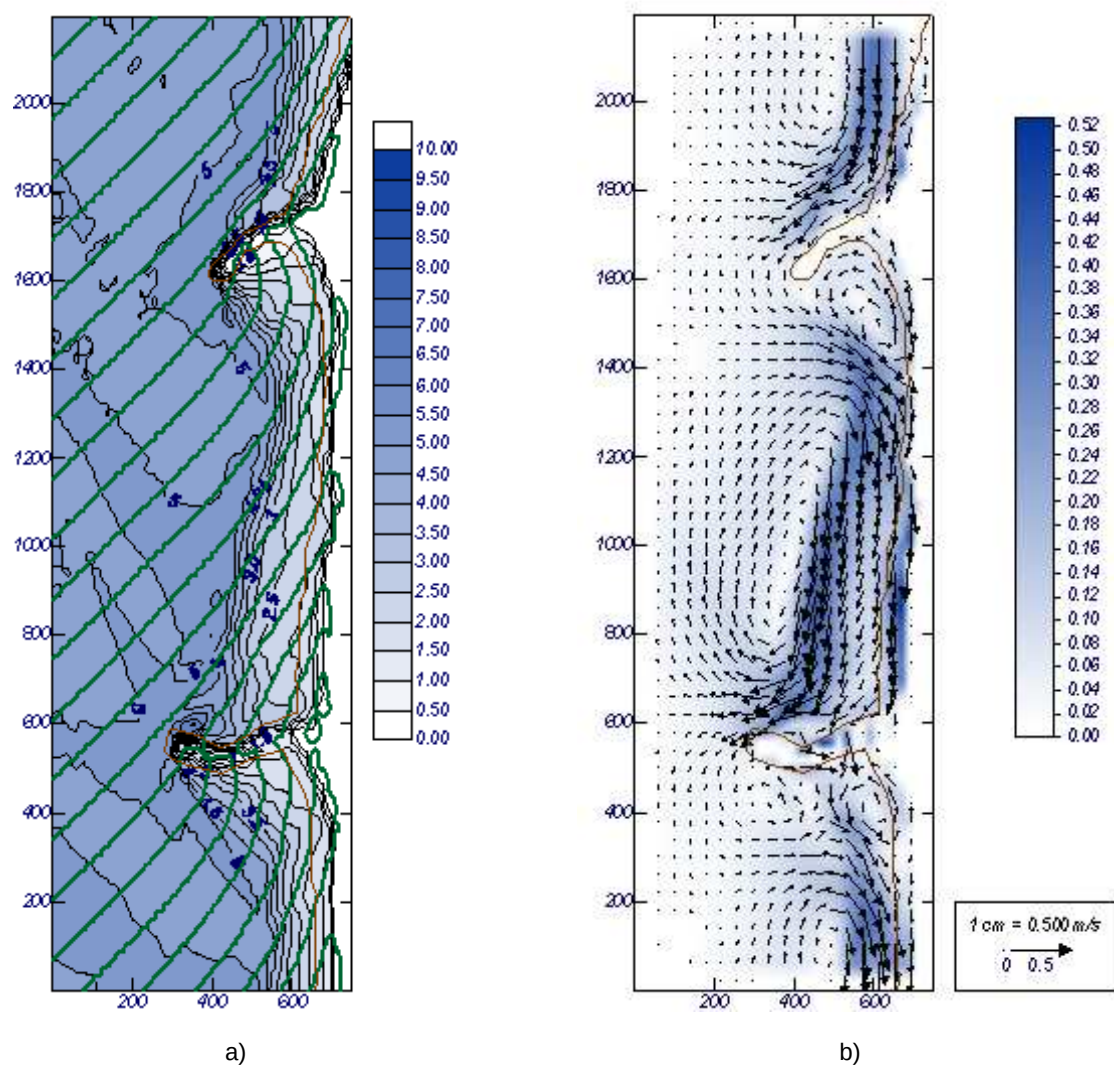


Figura A43 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectors corrente-magnitude, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de noroeste.

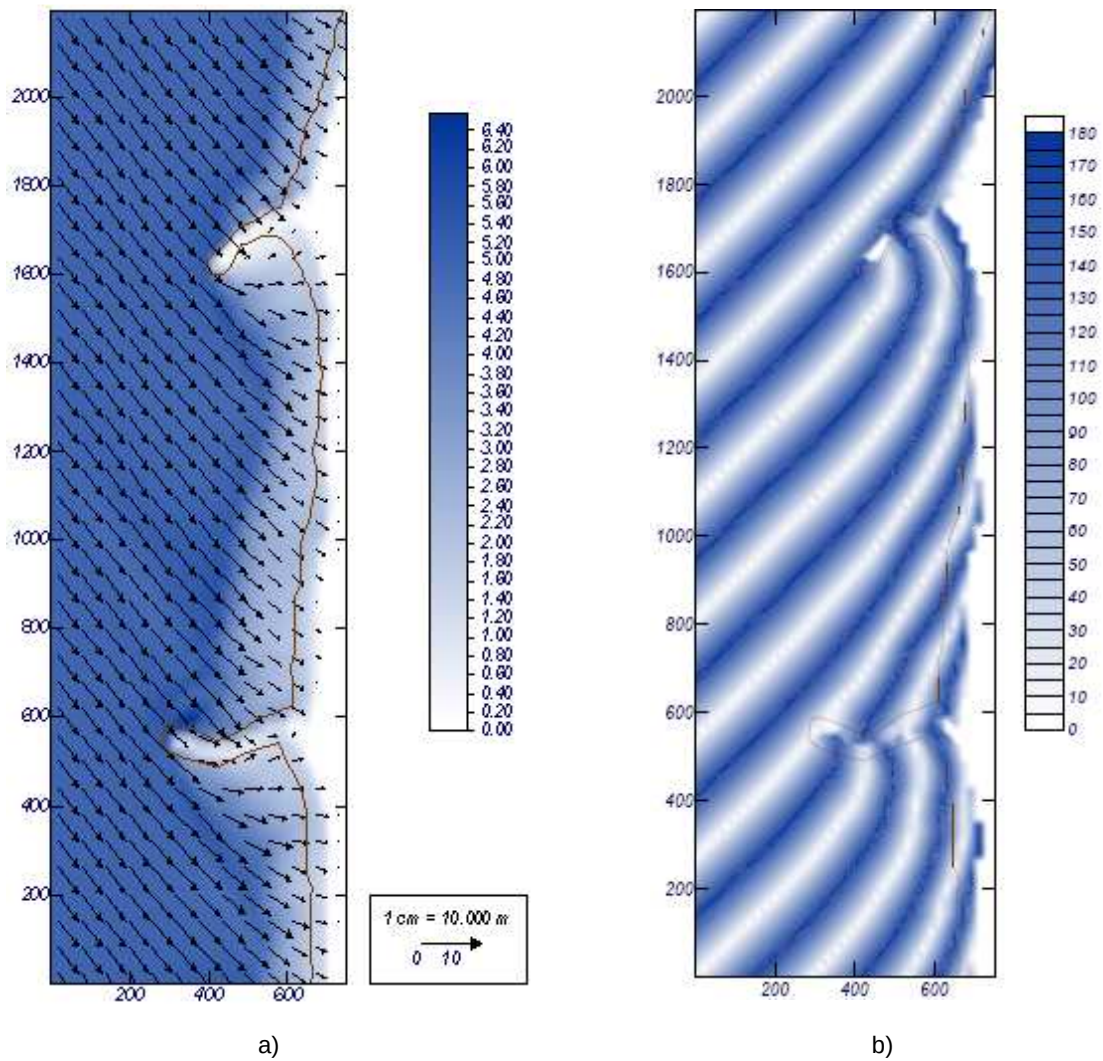


Figura A44 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de noroeste.

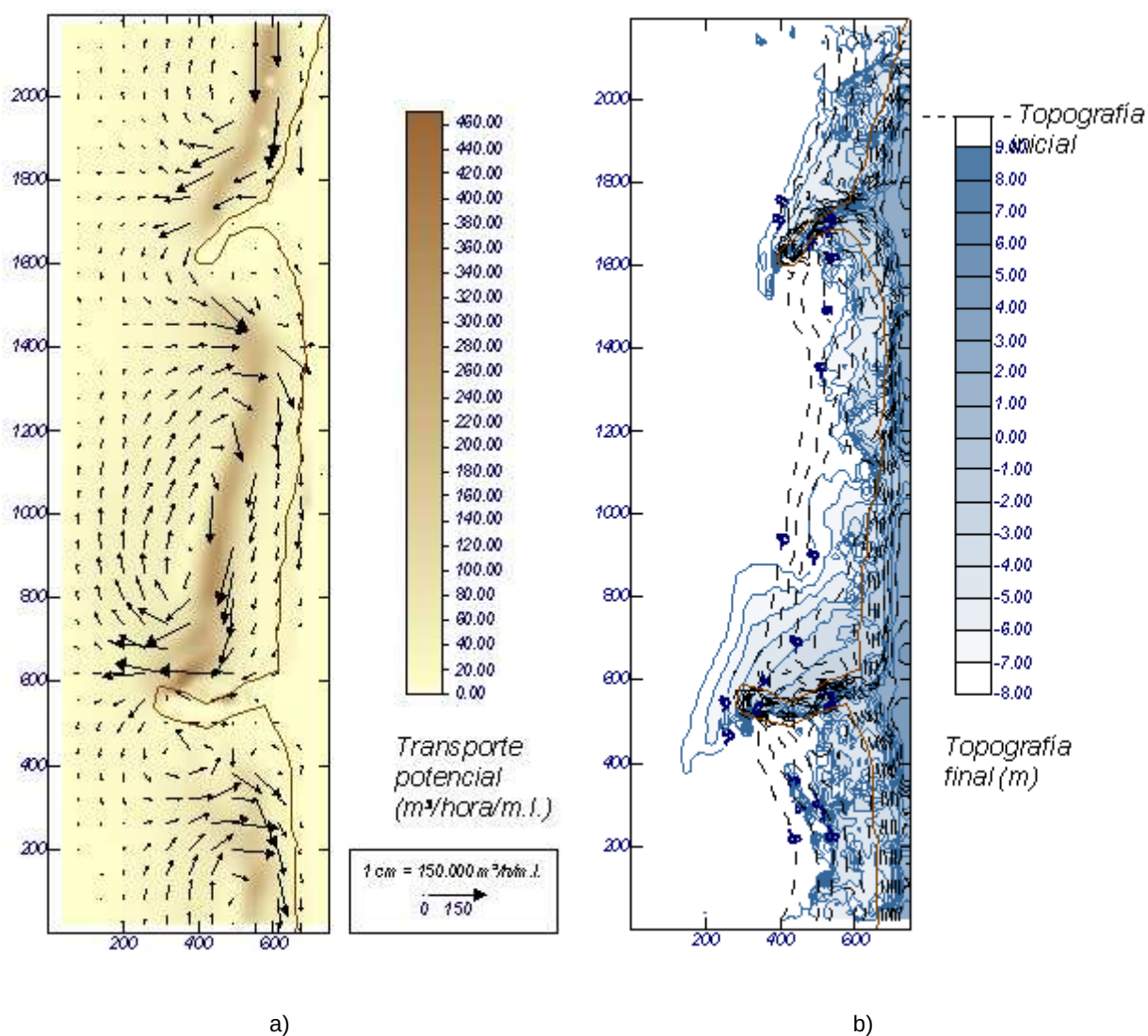


Figura A45 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de noroeste.

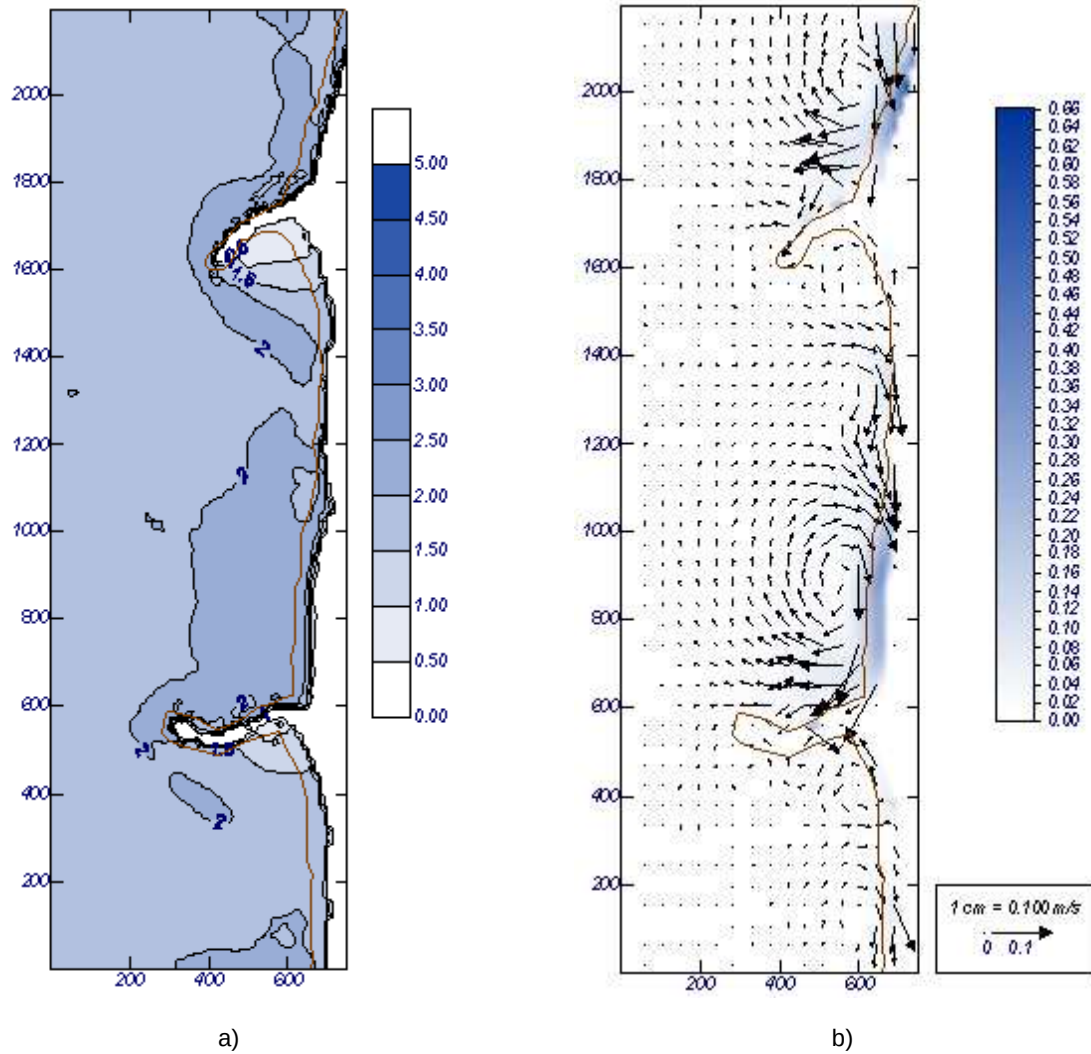
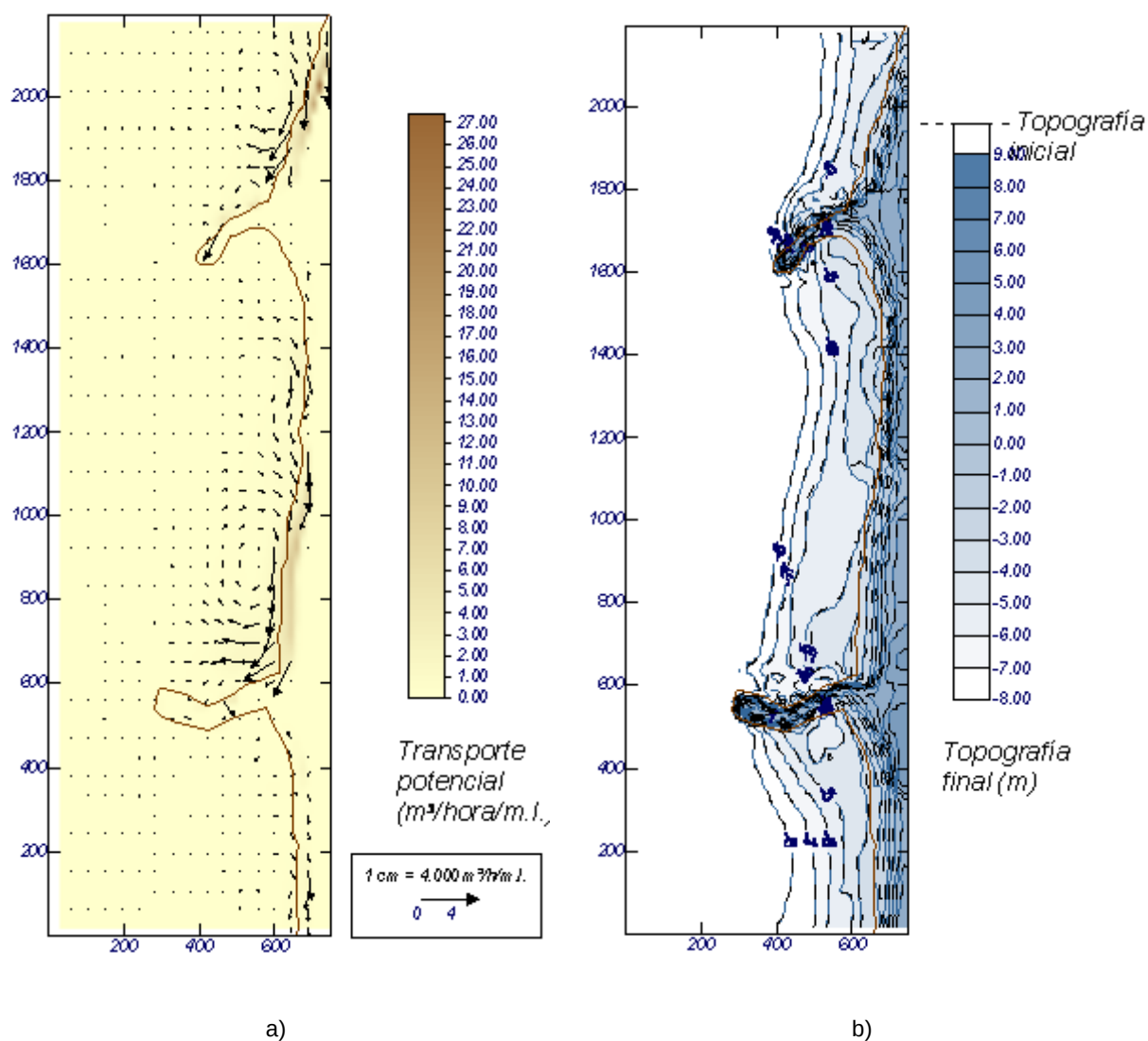


Figura A46 - a) Alturas de onda significativa, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: amplitude de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda significativa de 2 m, período de pico de 12 s, espectro direccional N65°W (+/-25°)



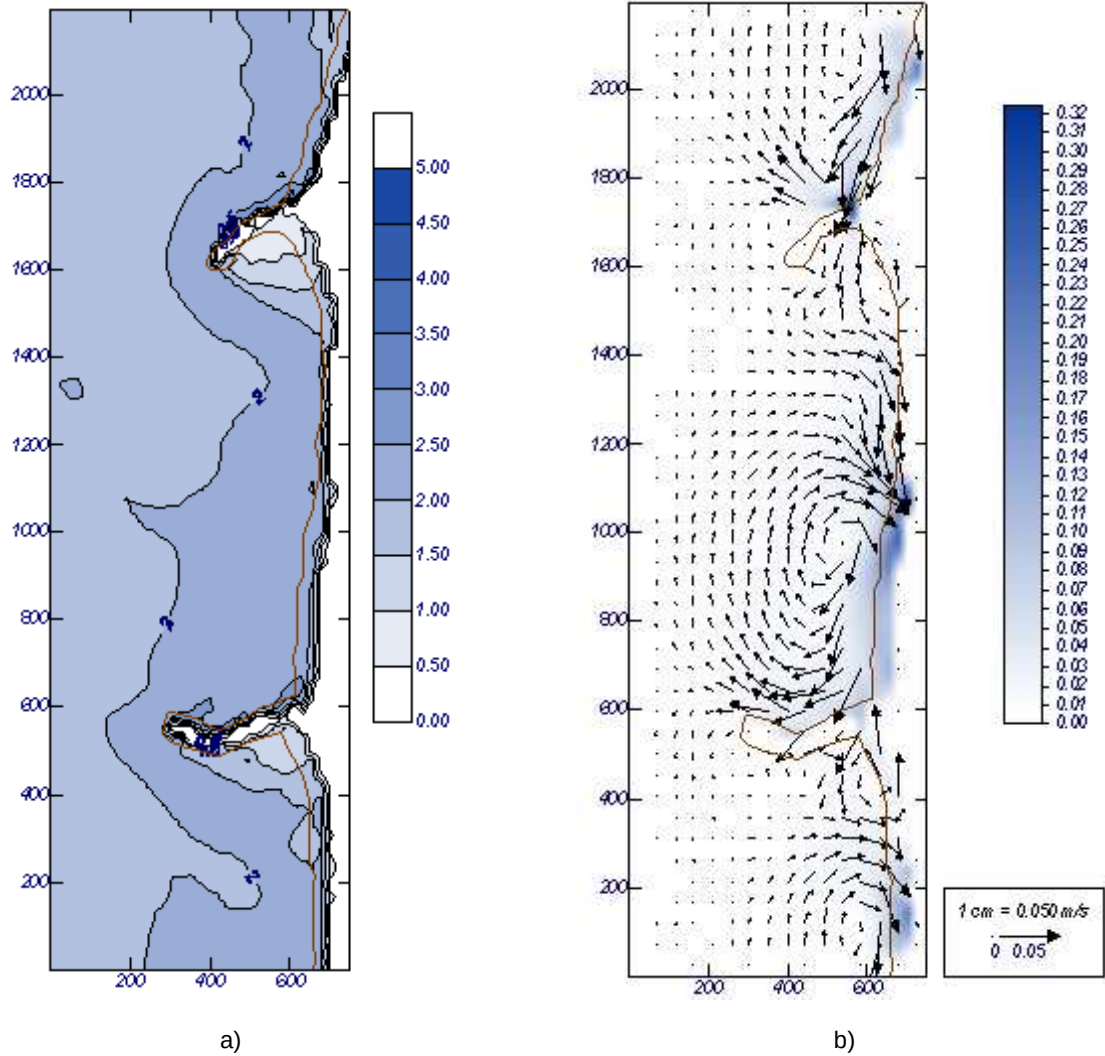


Figura A48 - a) Alturas de onda significativa, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: amplitude de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda significativa de 2 m, período de pico de 18 s, espectro direccional N65°W (+/-25°)

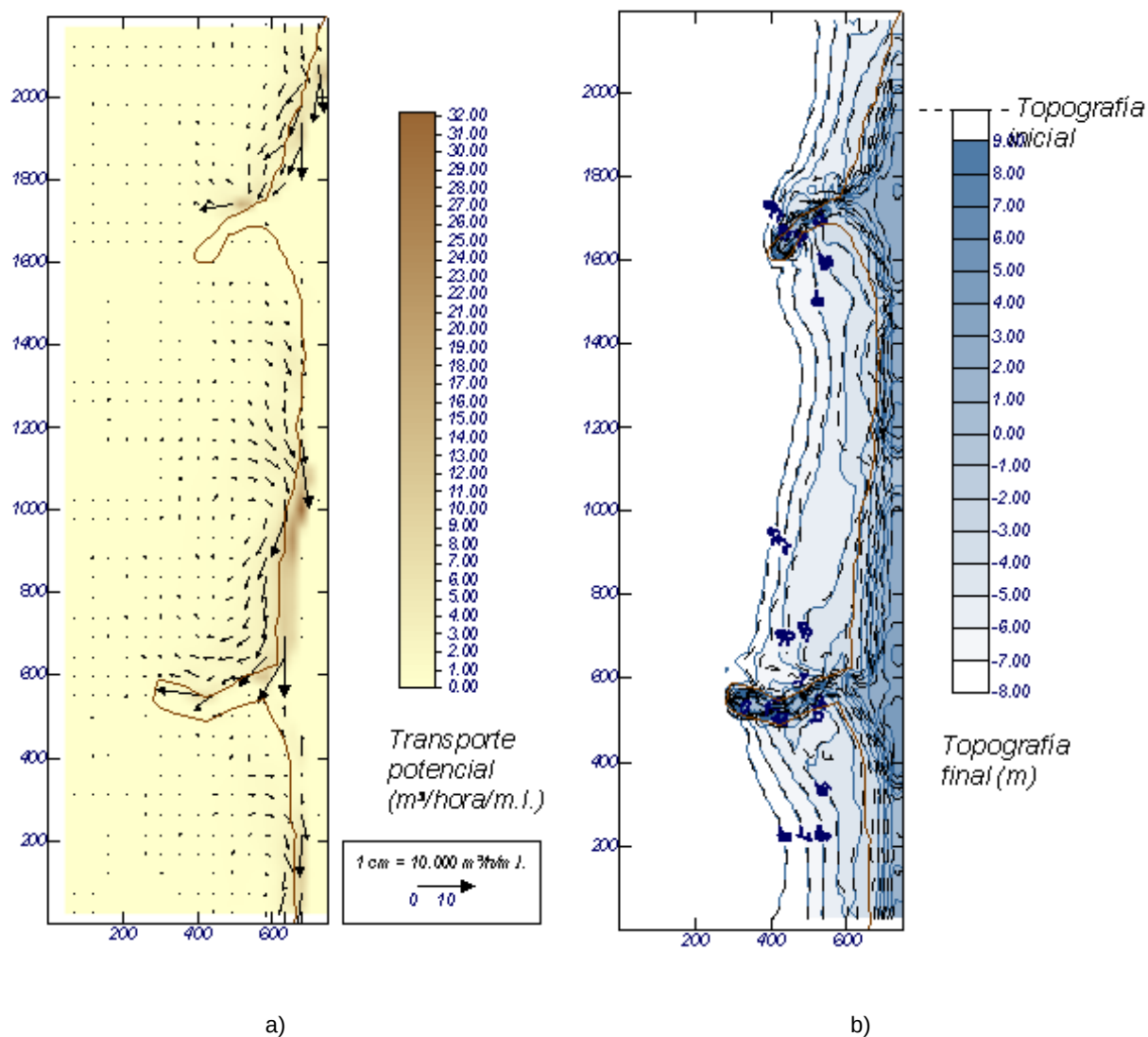


Figura A49 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: amplitude de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de significativa 2 m, período de pico de 18 s, espectro direcciona N65°W (+/- 25°)

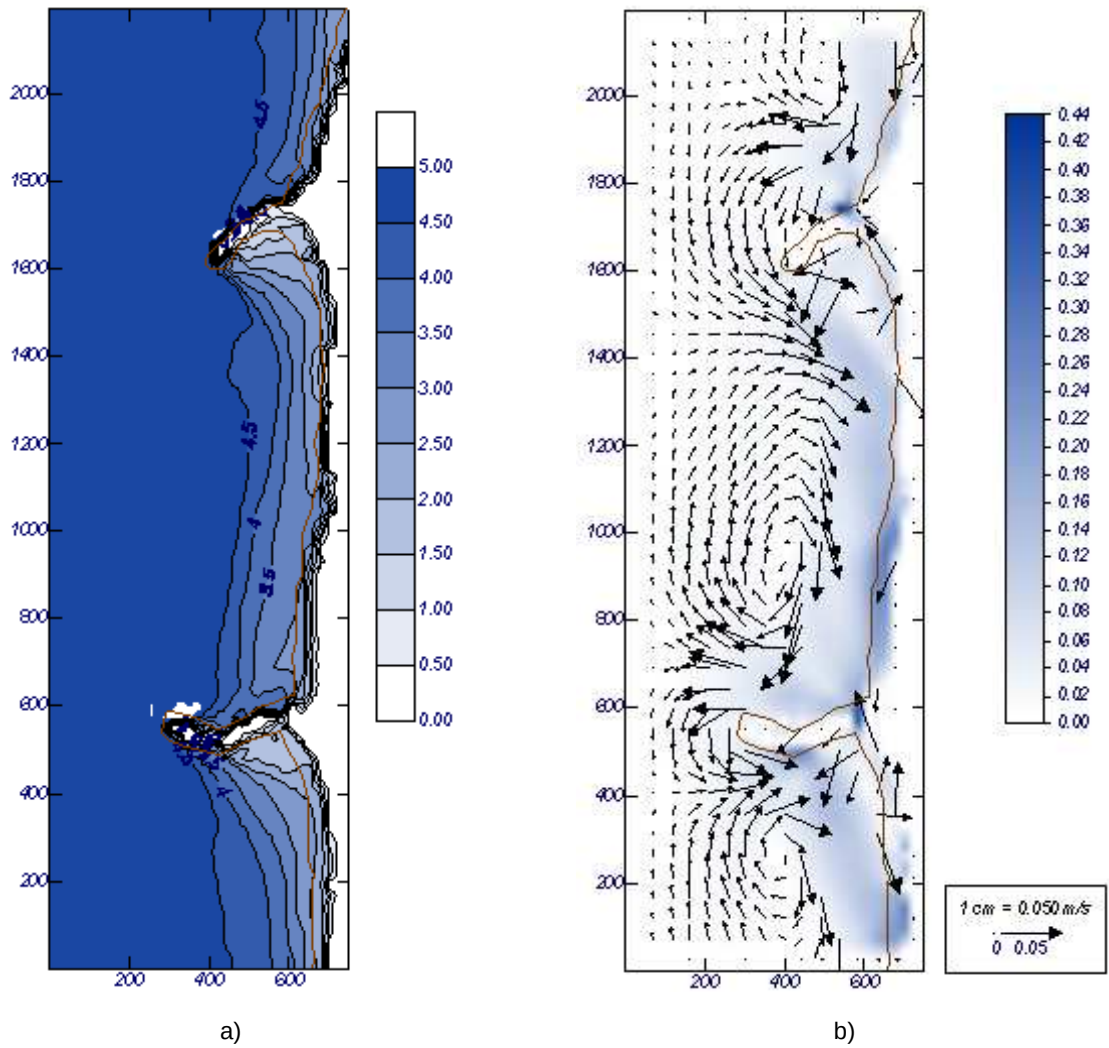


Figura A50 - a) Alturas de onda significativa, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: amplitude de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda significativa de 5 m, período de pico de 18 s, espectro direccional N65°W (+/-25°)

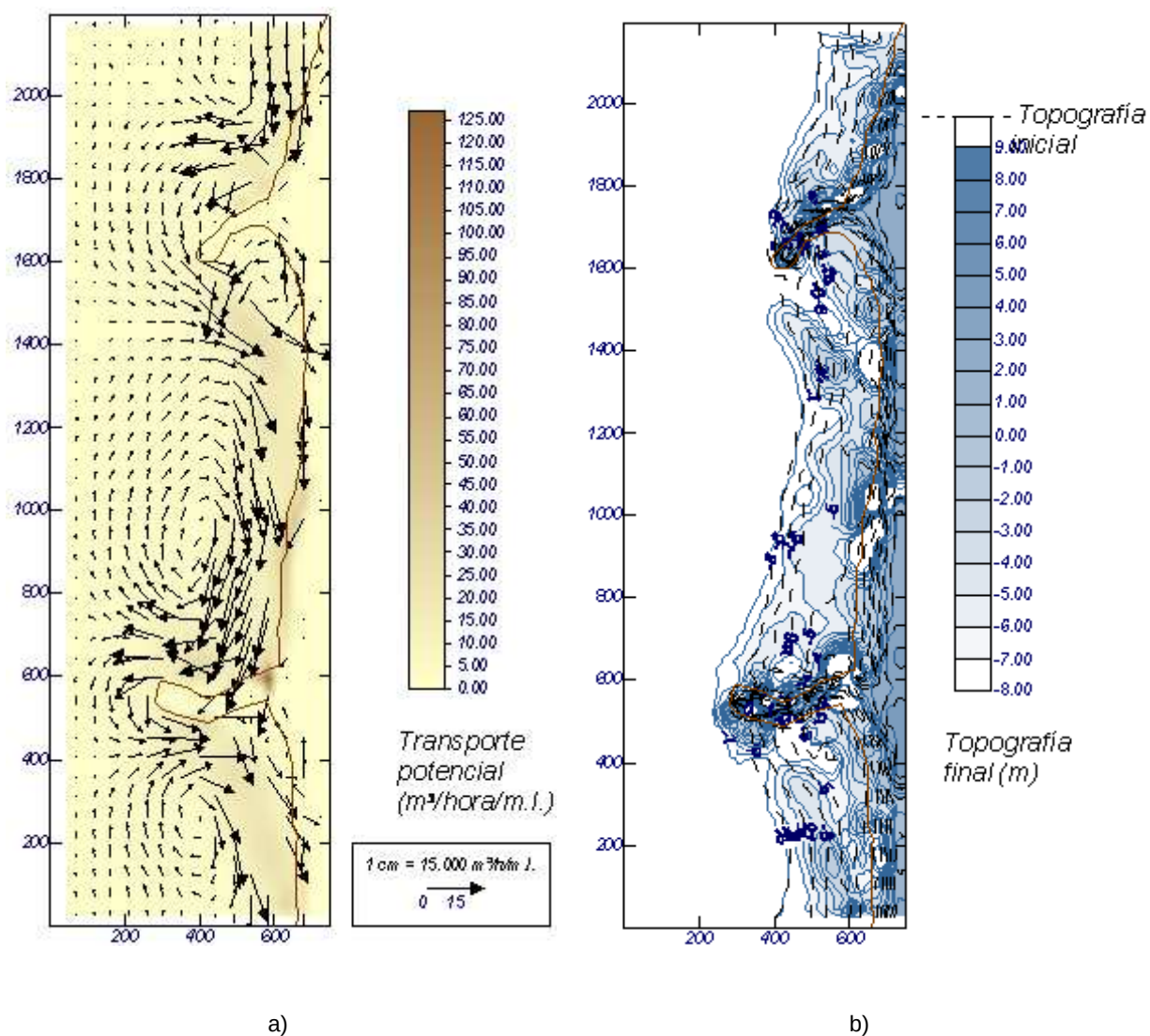


Figura A51 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: amplitude de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda significativa de 5 m, período de pico de 18 s, espectro direccional N65°W (+/- 25°)

ANEXO B - SIMULAÇÕES COM QUEBRAMAR DESTACADO

Simulações:

- Nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2 m, período de 12 s, orientação da agitação de oeste;
- Nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2 m, período de 18 s, orientação da agitação de oeste;
- Nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2 m, período de 12 s, orientação da agitação de noroeste;
- Nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2 m, período de 18 s, orientação da agitação de noroeste;
- Nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de 12 s, orientação da agitação de oeste;
- Nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de 18 s, orientação da agitação de oeste;
- Nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de 12 s, orientação da agitação de noroeste;
- Nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de 18 s, orientação da agitação de noroeste;
- Nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2 m, período de 12 s, orientação da agitação de oeste;
- Nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2 m, período de 18 s, orientação da agitação de oeste;
- Nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2 m, período de 12 s, orientação da agitação de noroeste;
- Nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2 m, período de 18 s, orientação da agitação de noroeste;
- Nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de 12 s, orientação da agitação de oeste;
- Nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de 12 s, orientação da agitação de noroeste;
- Amplitude de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda significativa de 2 m, período de pico de 12 s, e espectro direccional de N65°W (+/-25°);
- Amplitude de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda significativa de 2 m, período de pico de 18 s, e espectro direccional de N65°W (+/-25°);
- Amplitude de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda significativa de 5 m, período de pico de 18 s, e espectro direccional de N65°W (+/-25°).

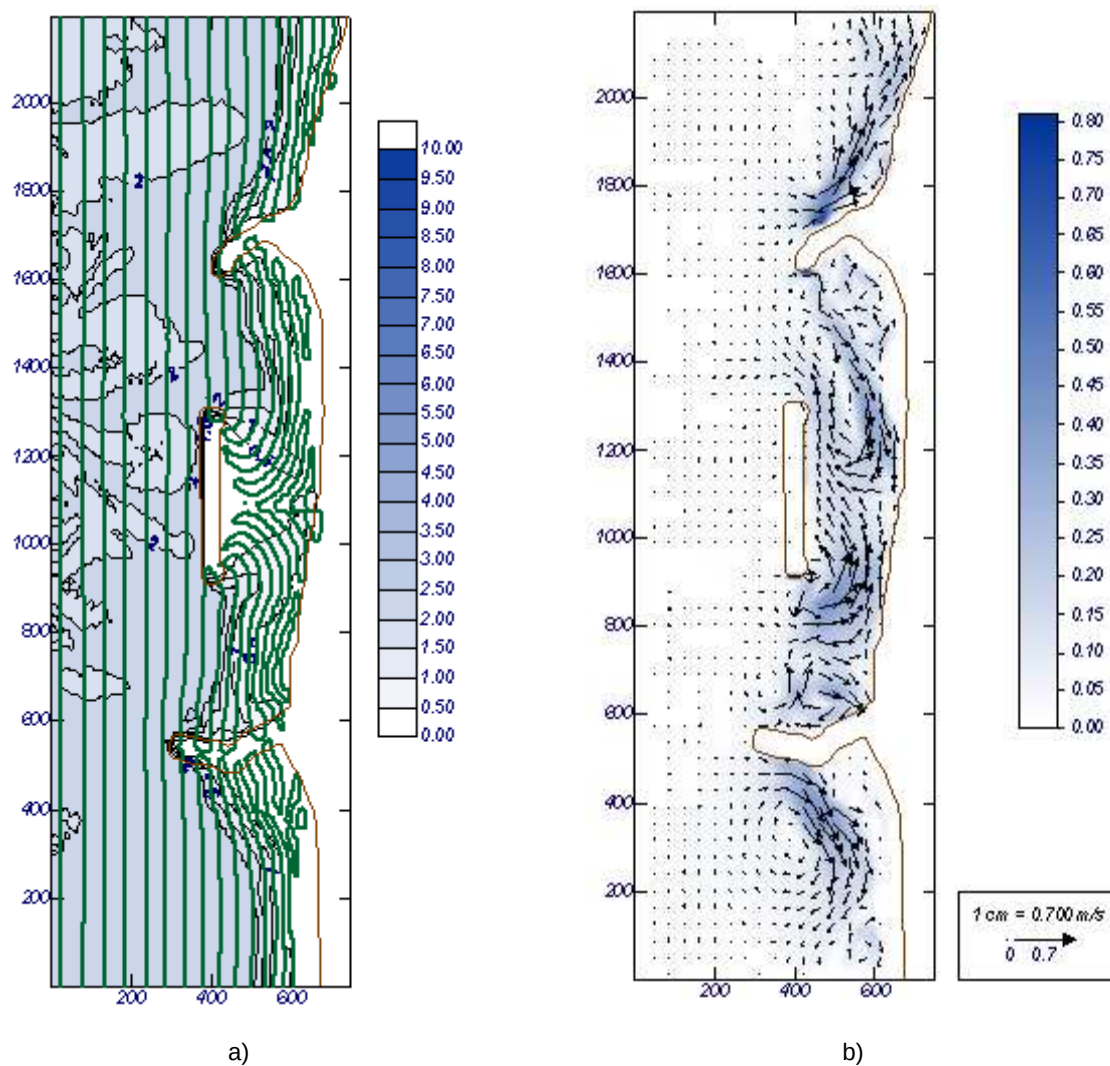


Figura B1 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectors corrente-magnitude, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

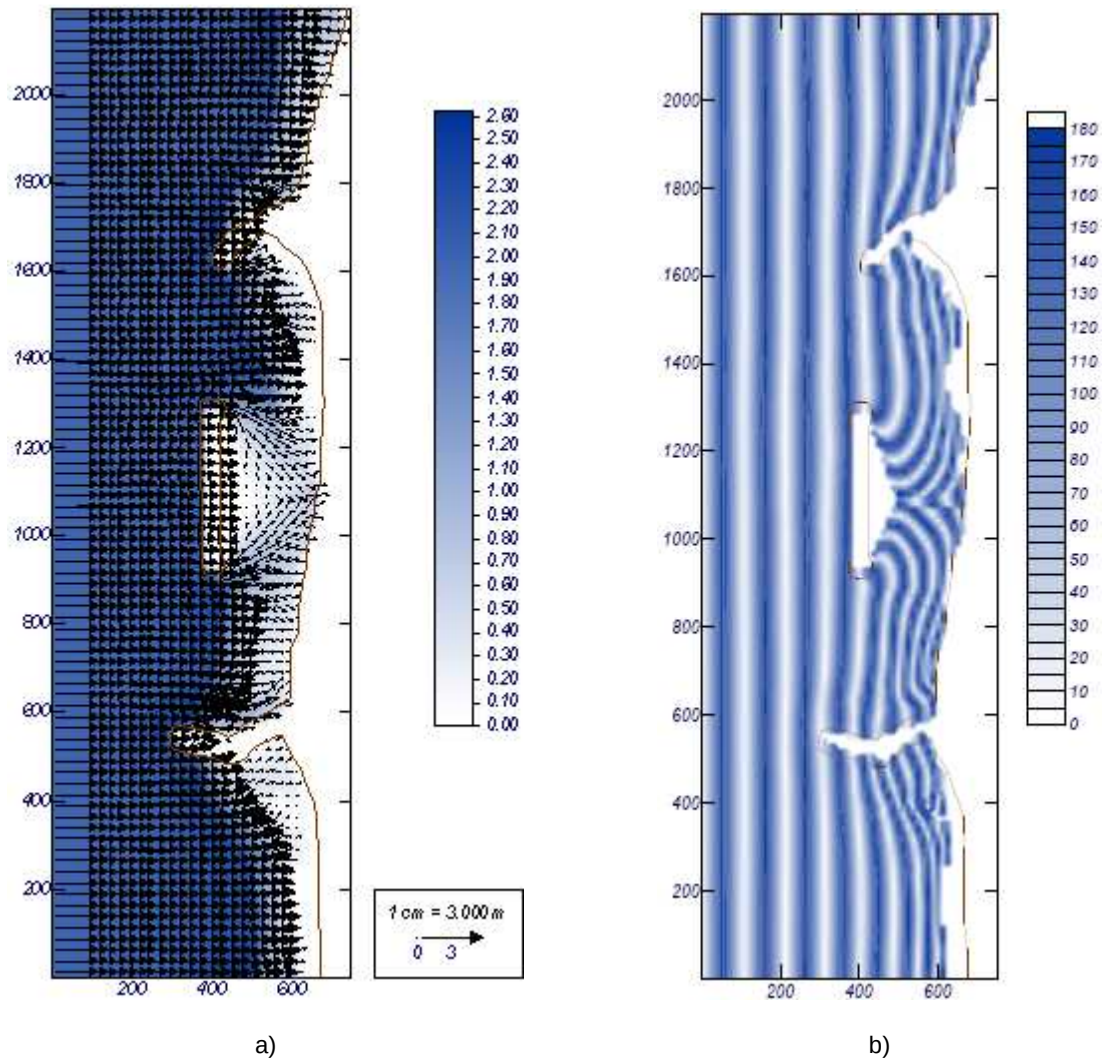


Figura B2 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

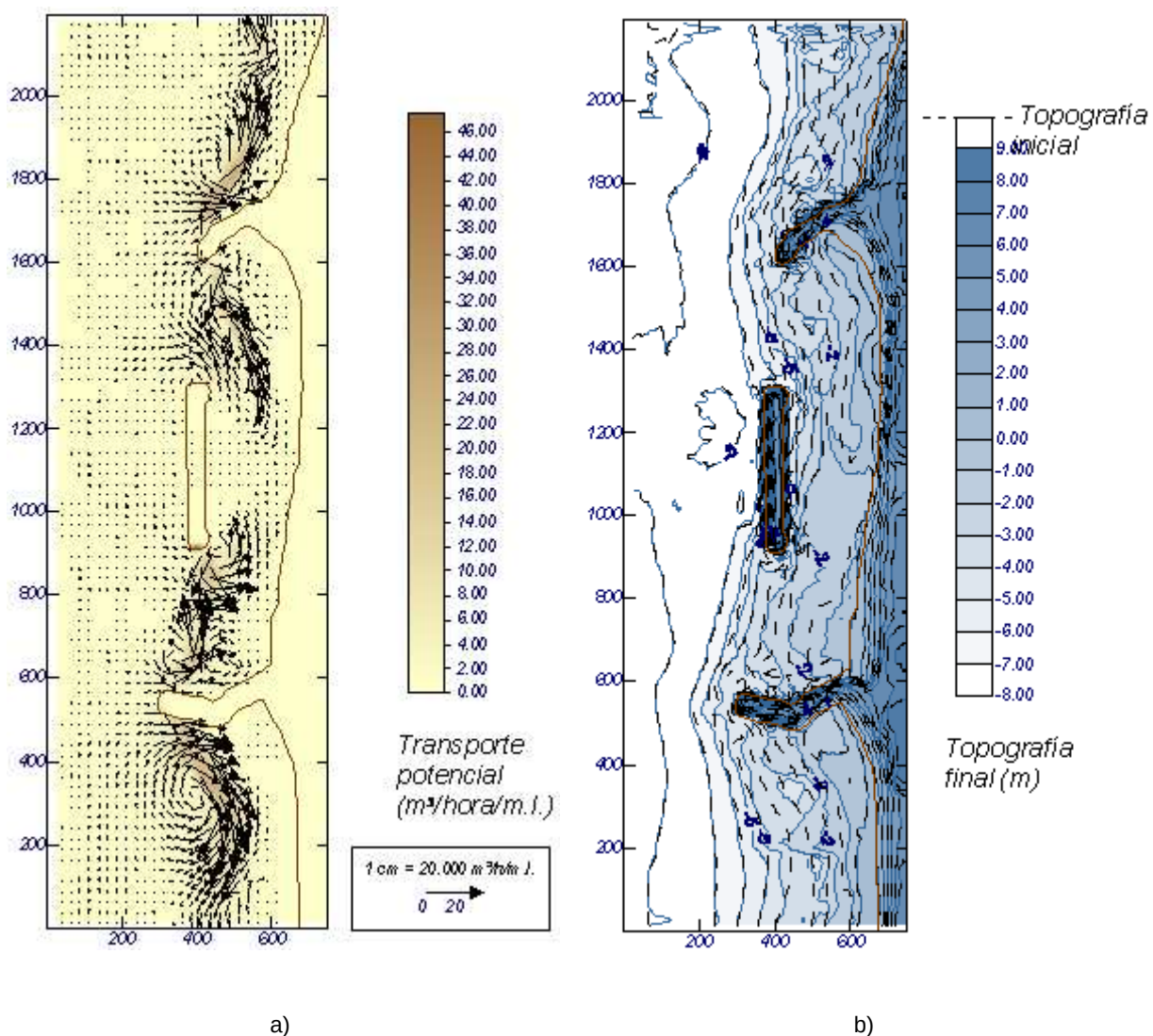


Figura B3 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

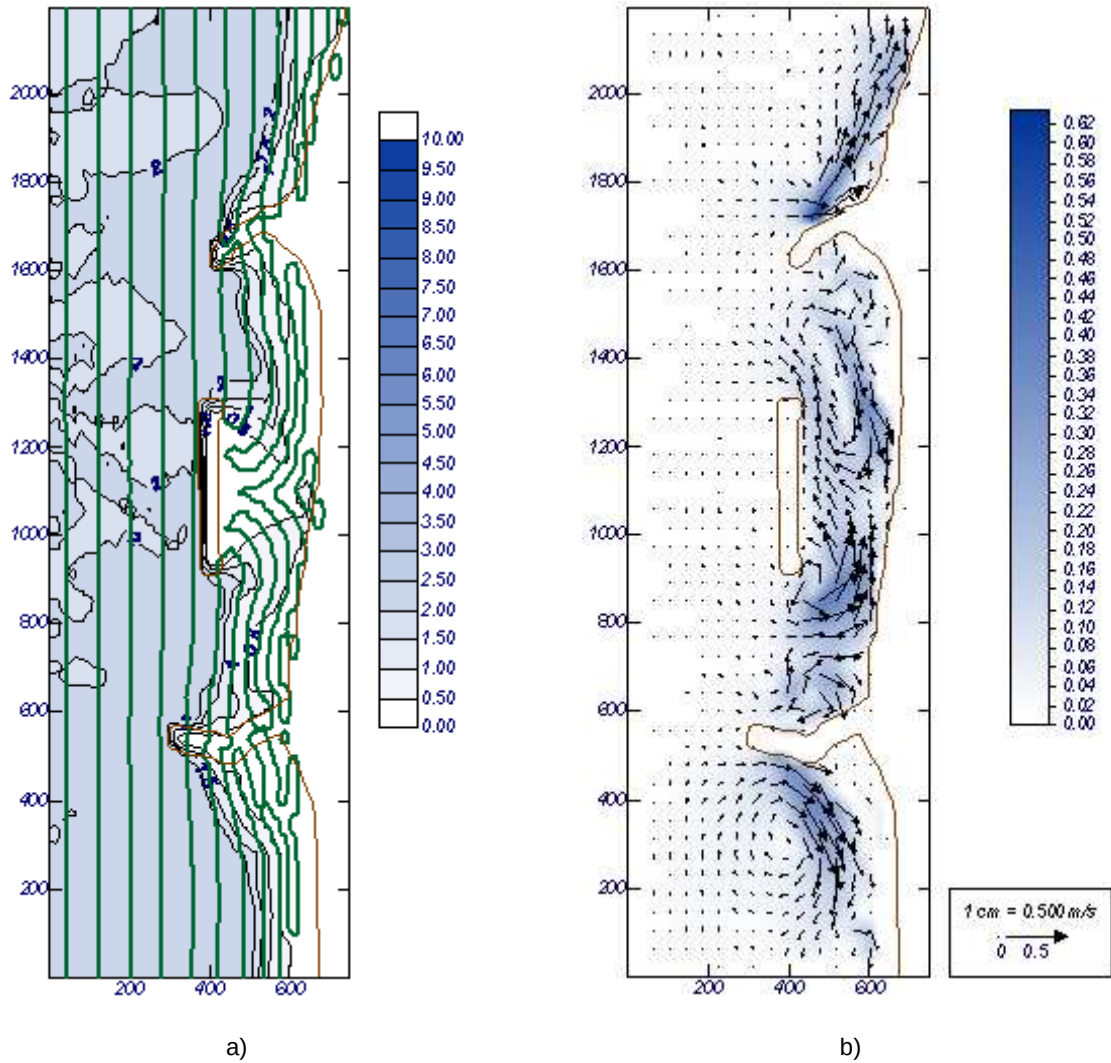


Figura B4 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

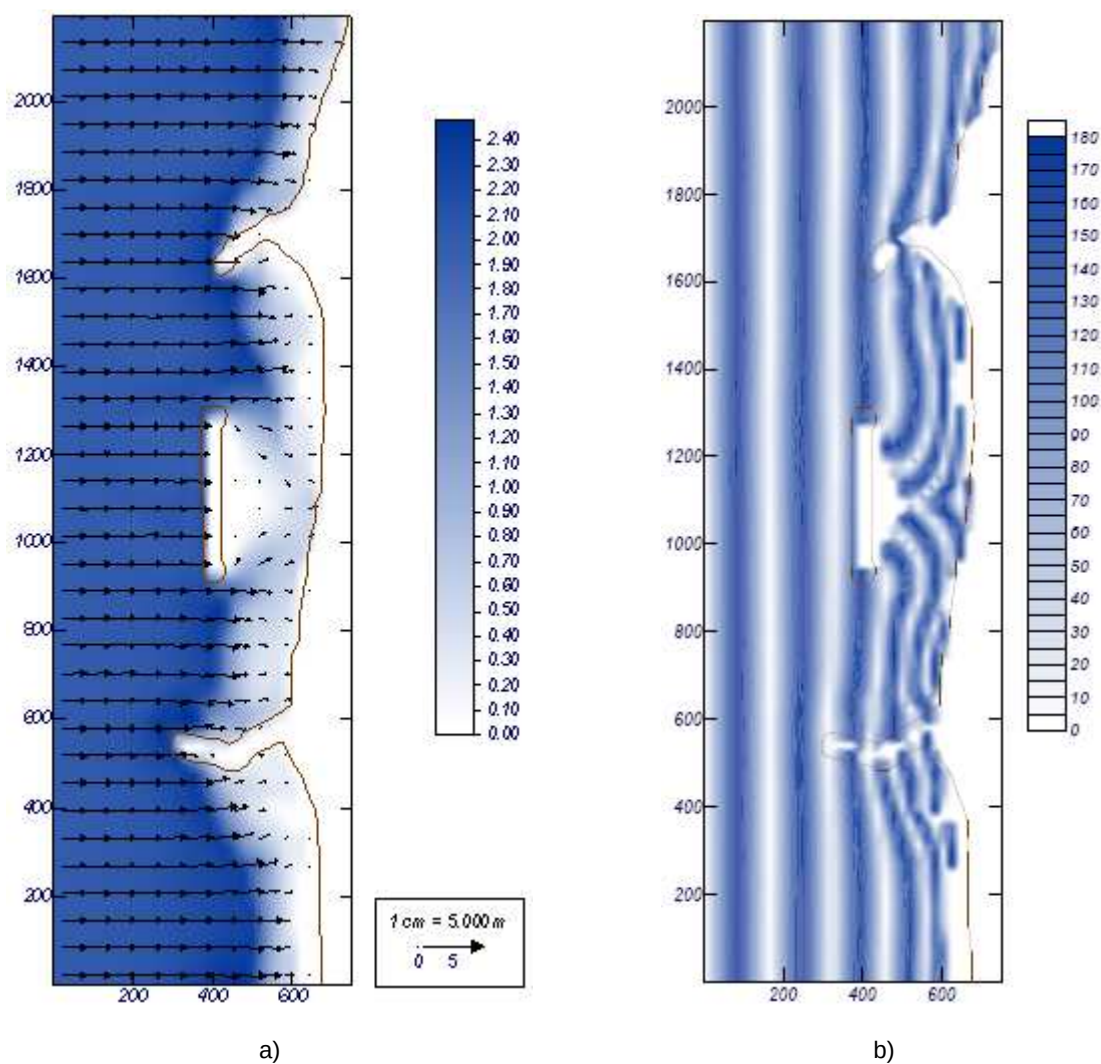


Figura B5 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

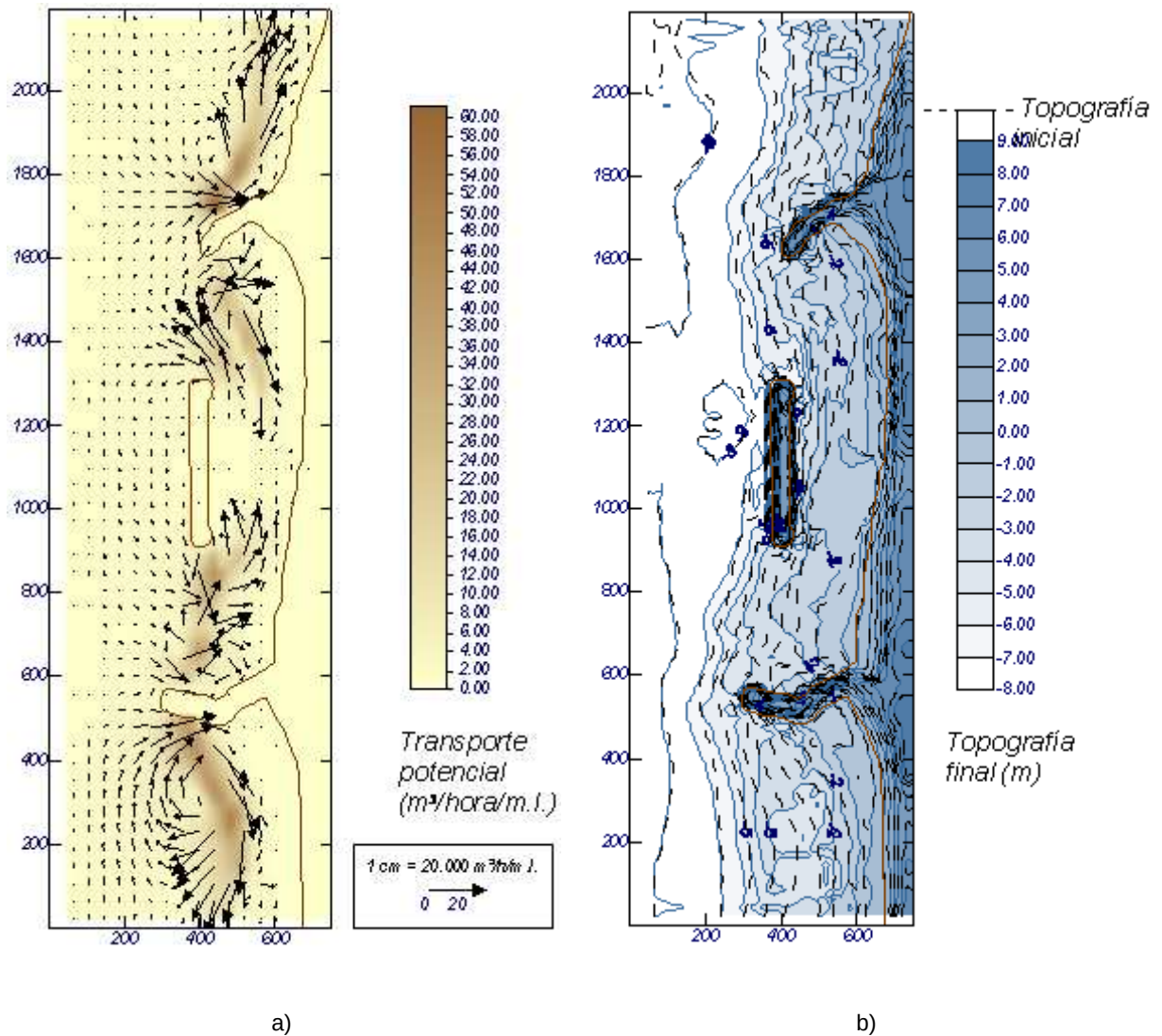


Figura B6 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

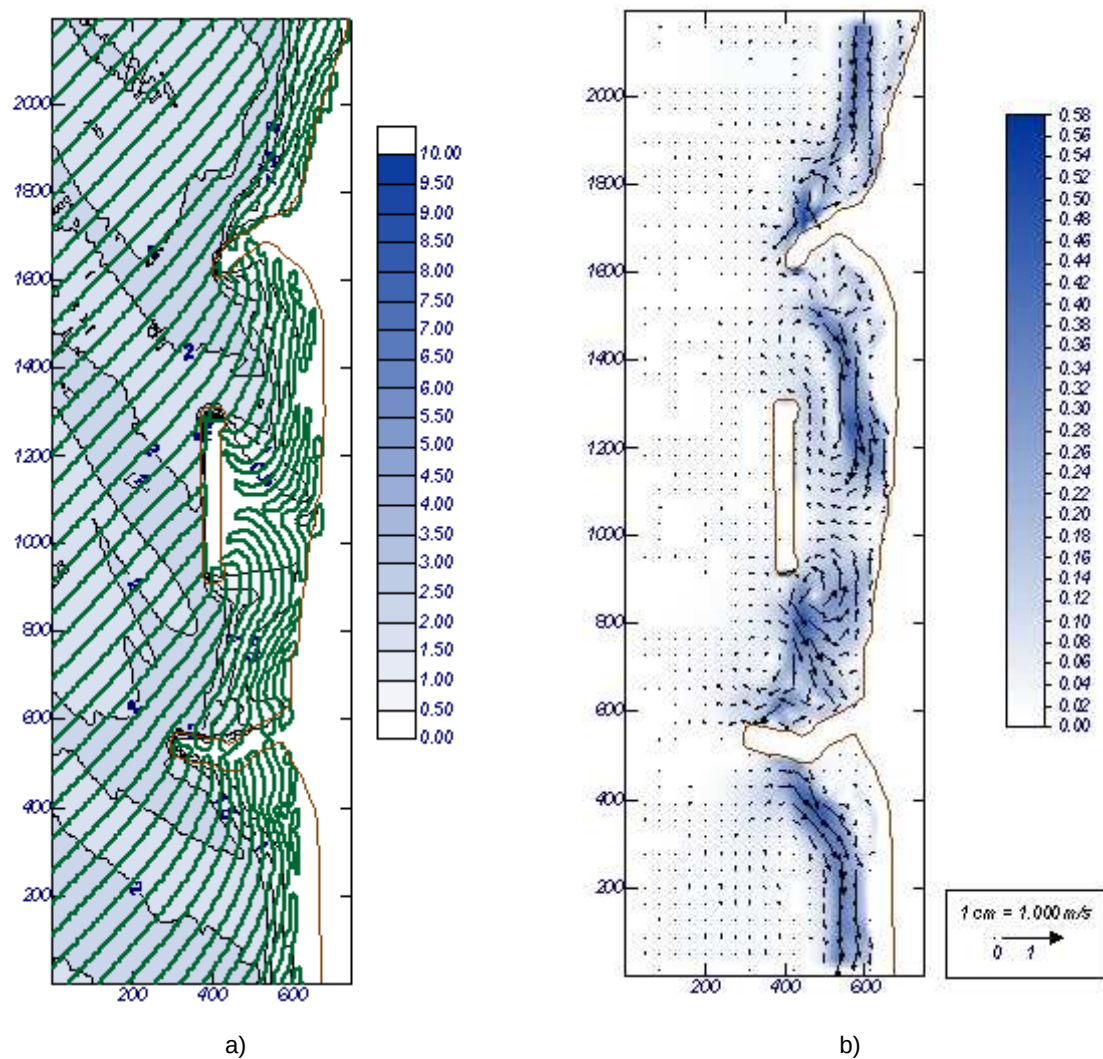


Figura B7 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

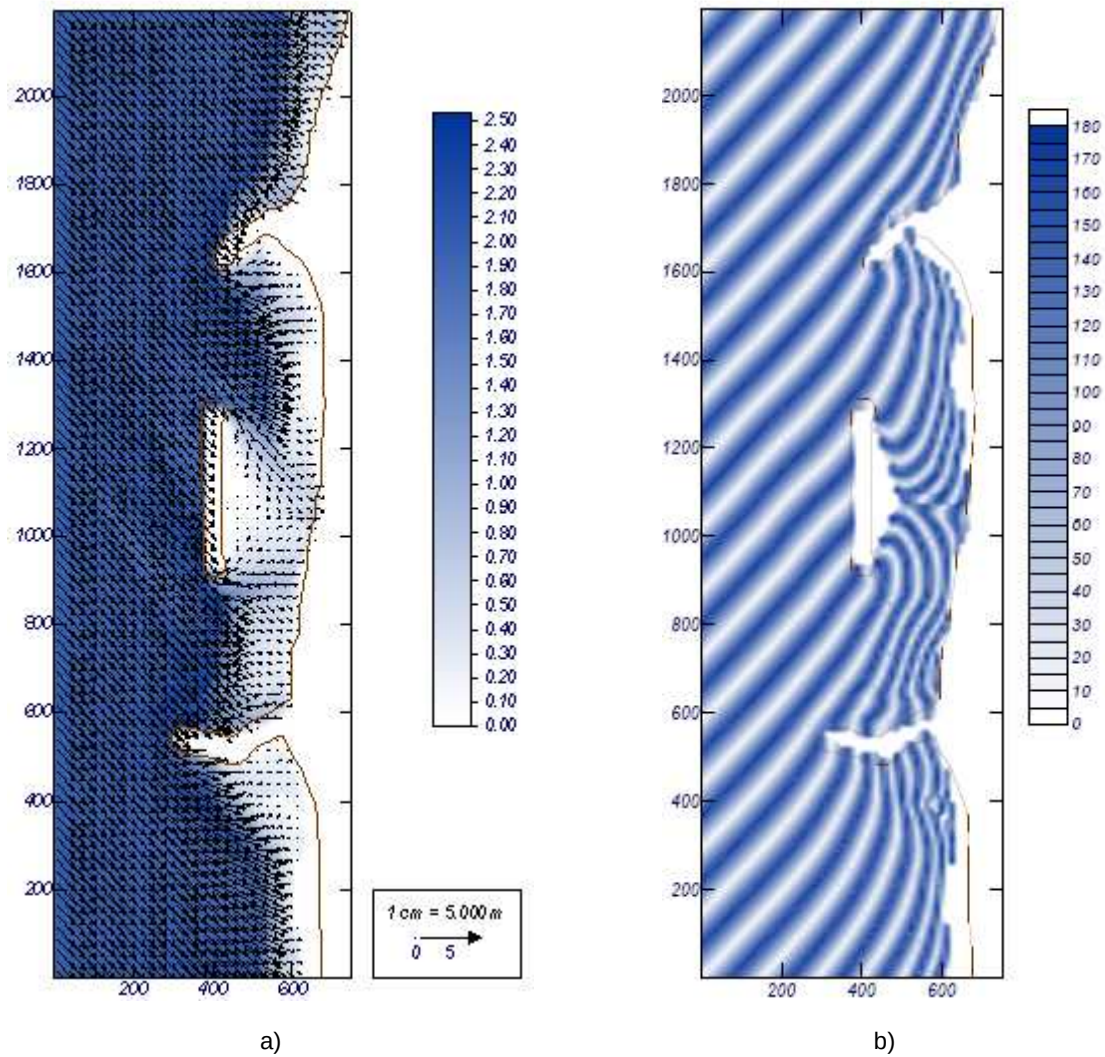


Figura B8 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

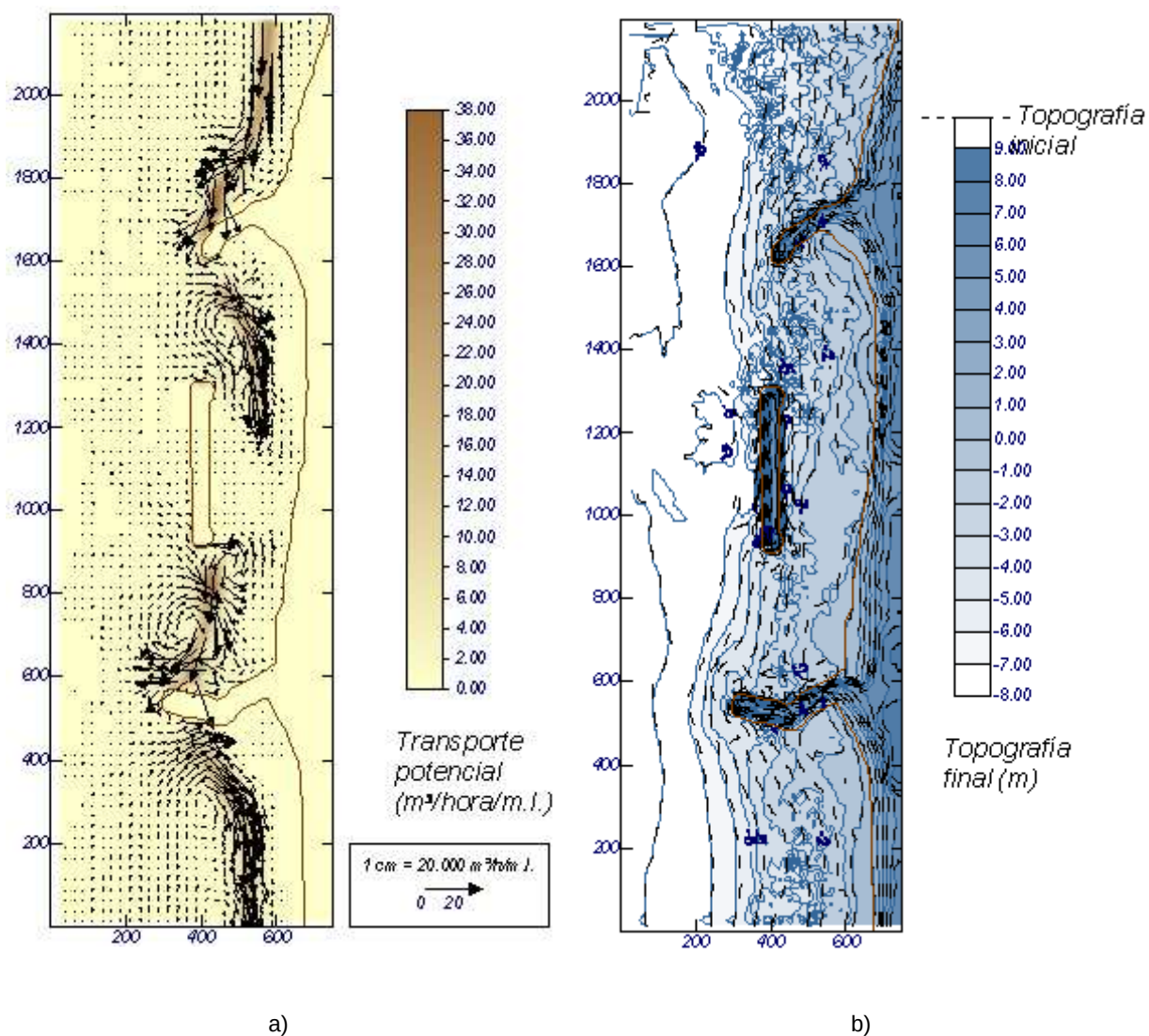


Figura B9 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

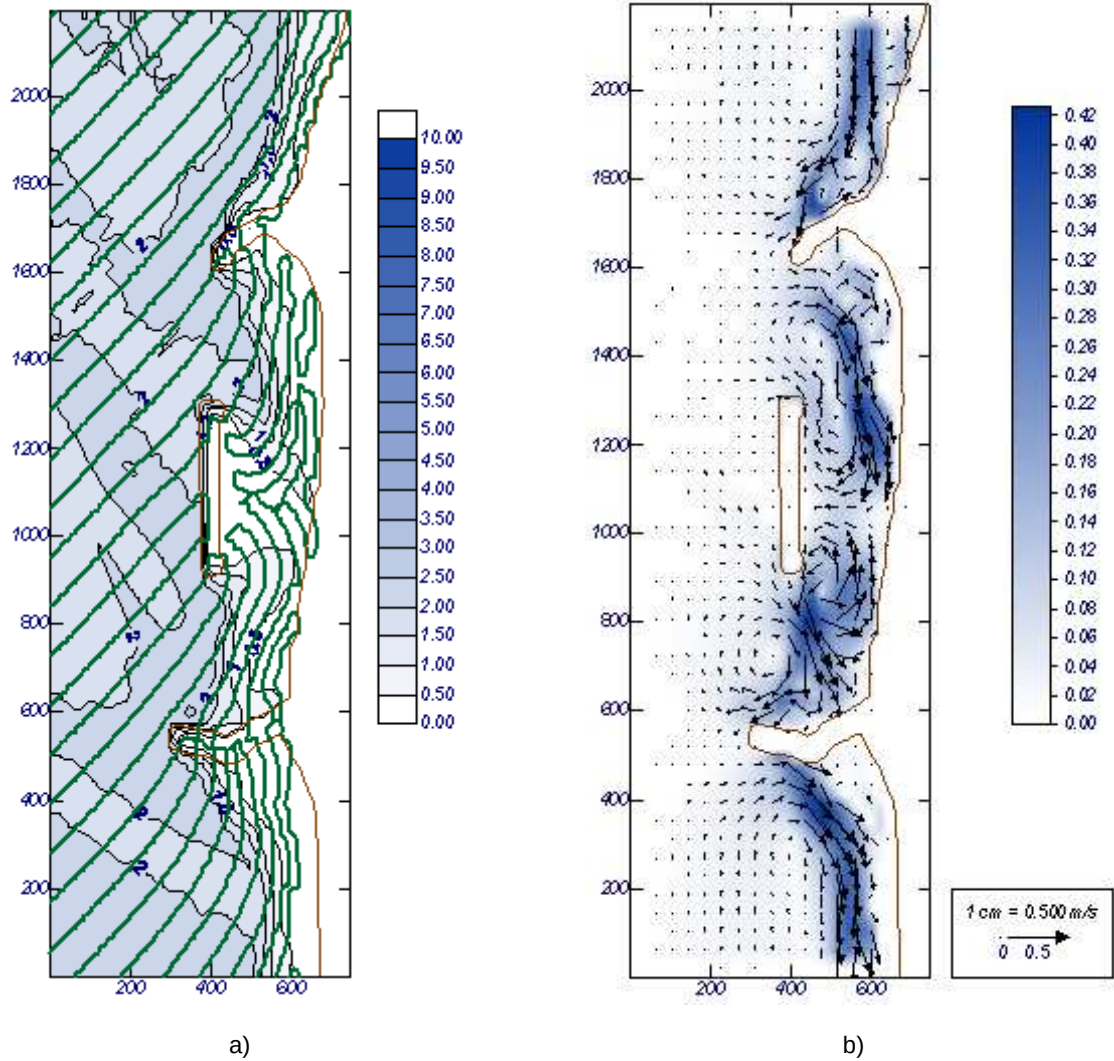


Figura B10 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de noroeste.

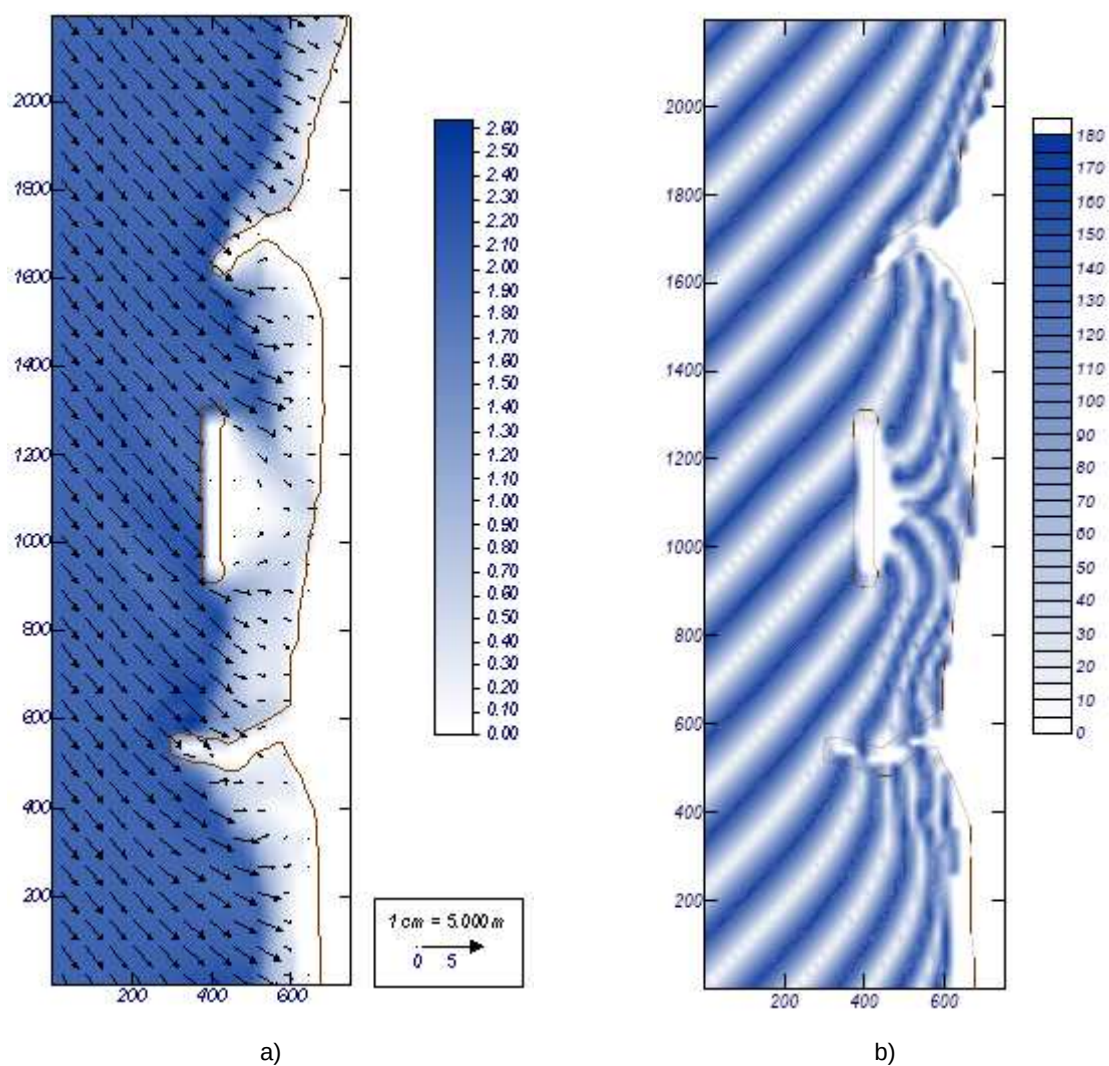


Figura B11 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de noroeste.

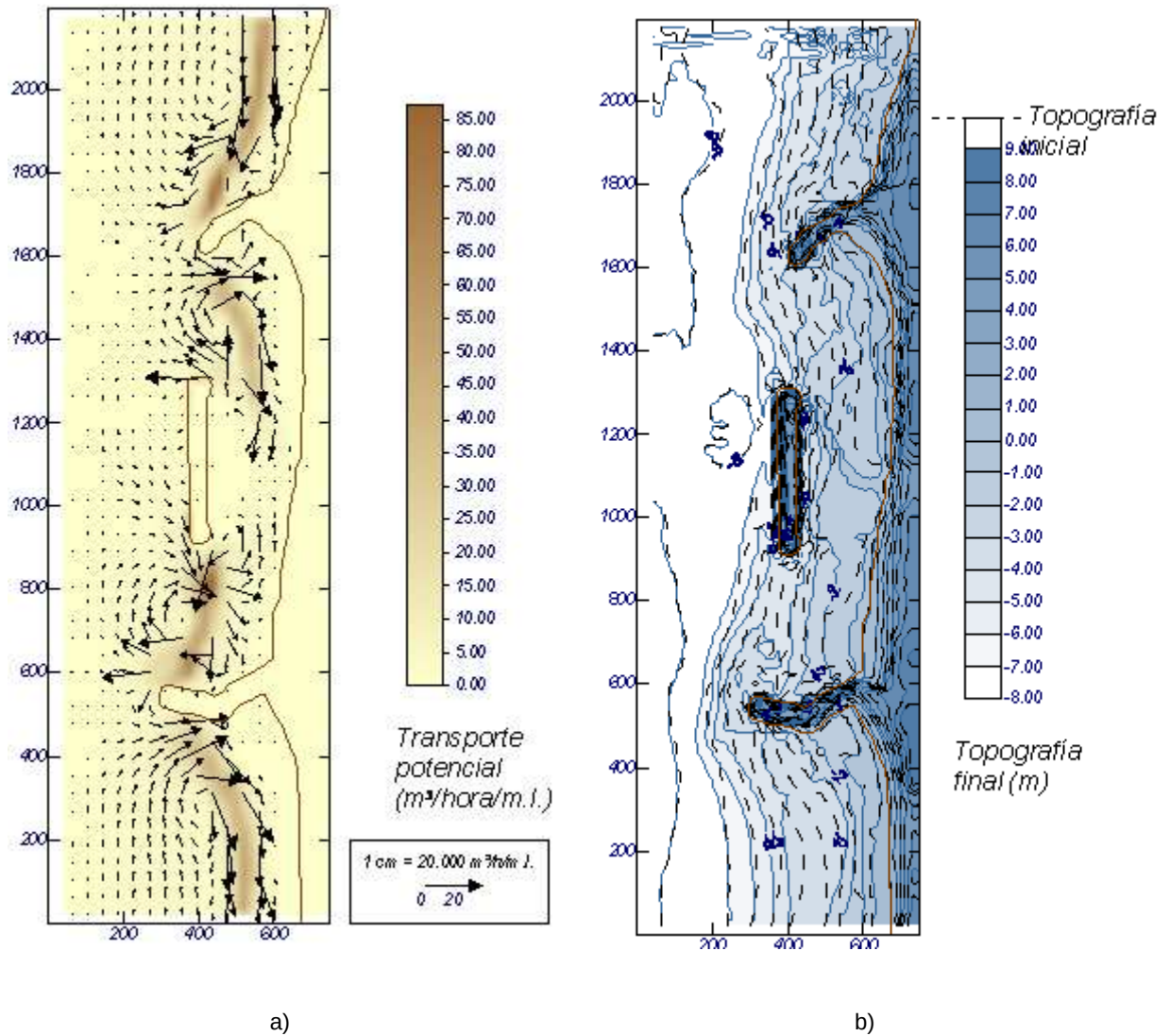


Figura B12 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de noroeste.

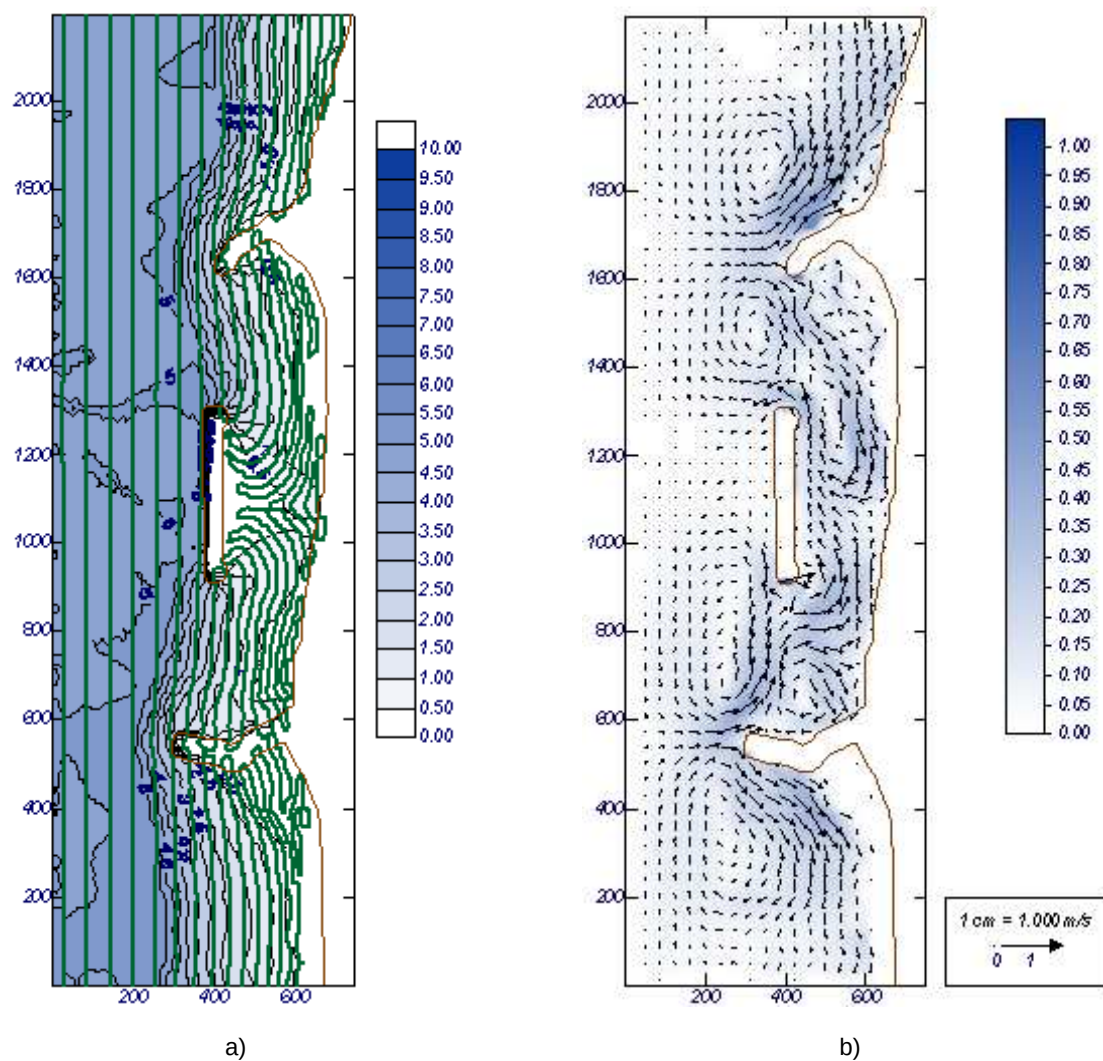


Figura B13 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

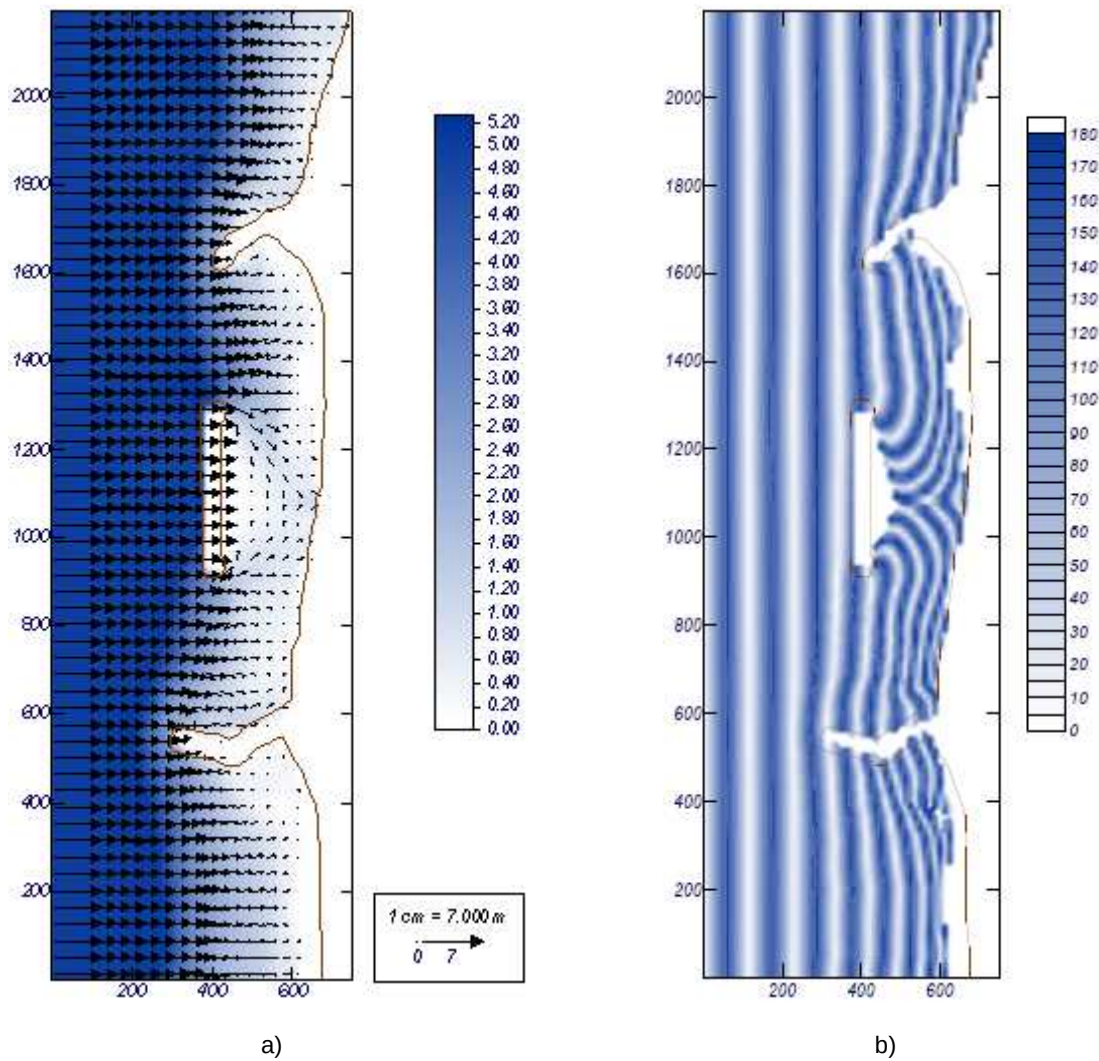


Figura B14 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

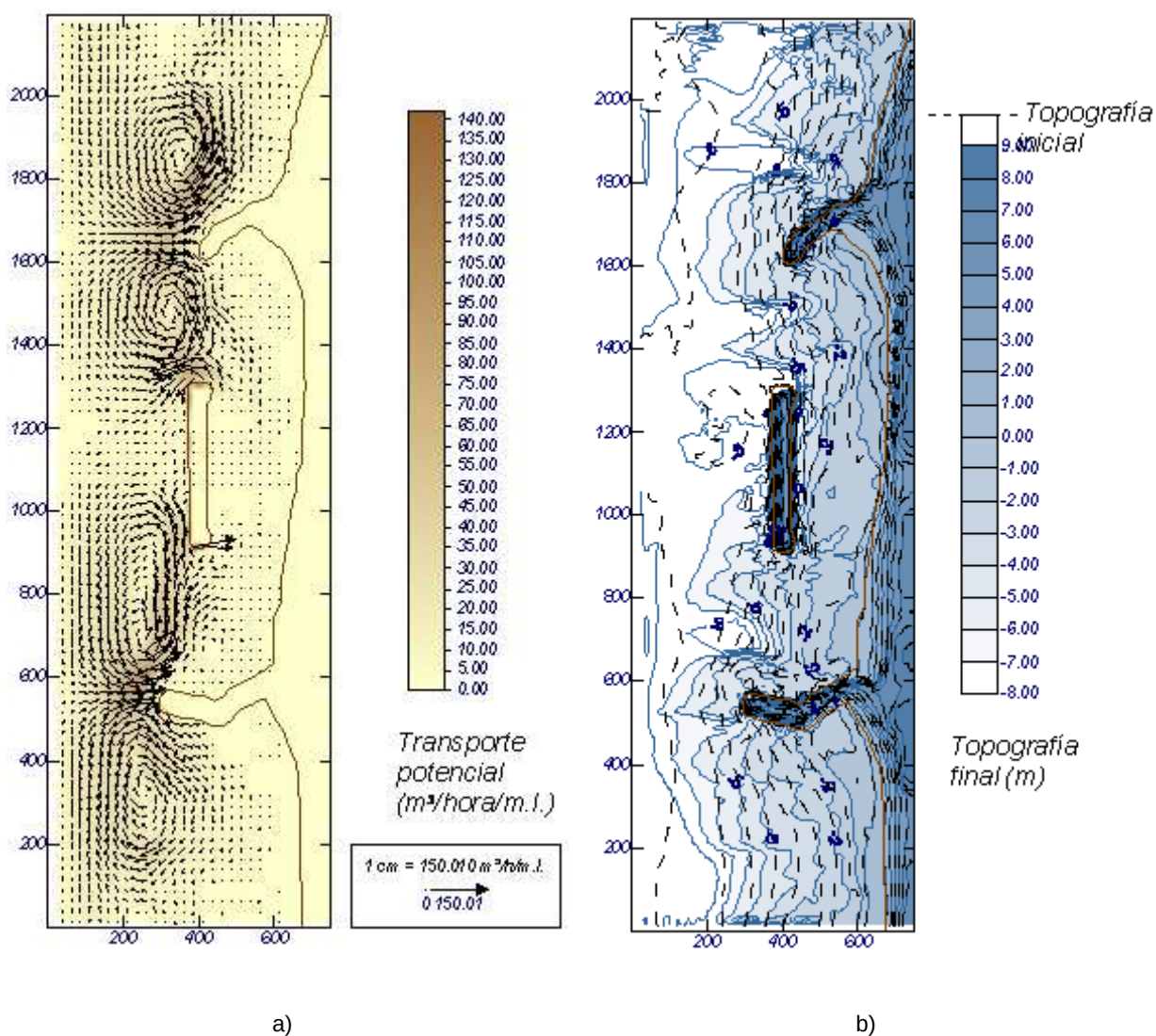


Figura B15 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

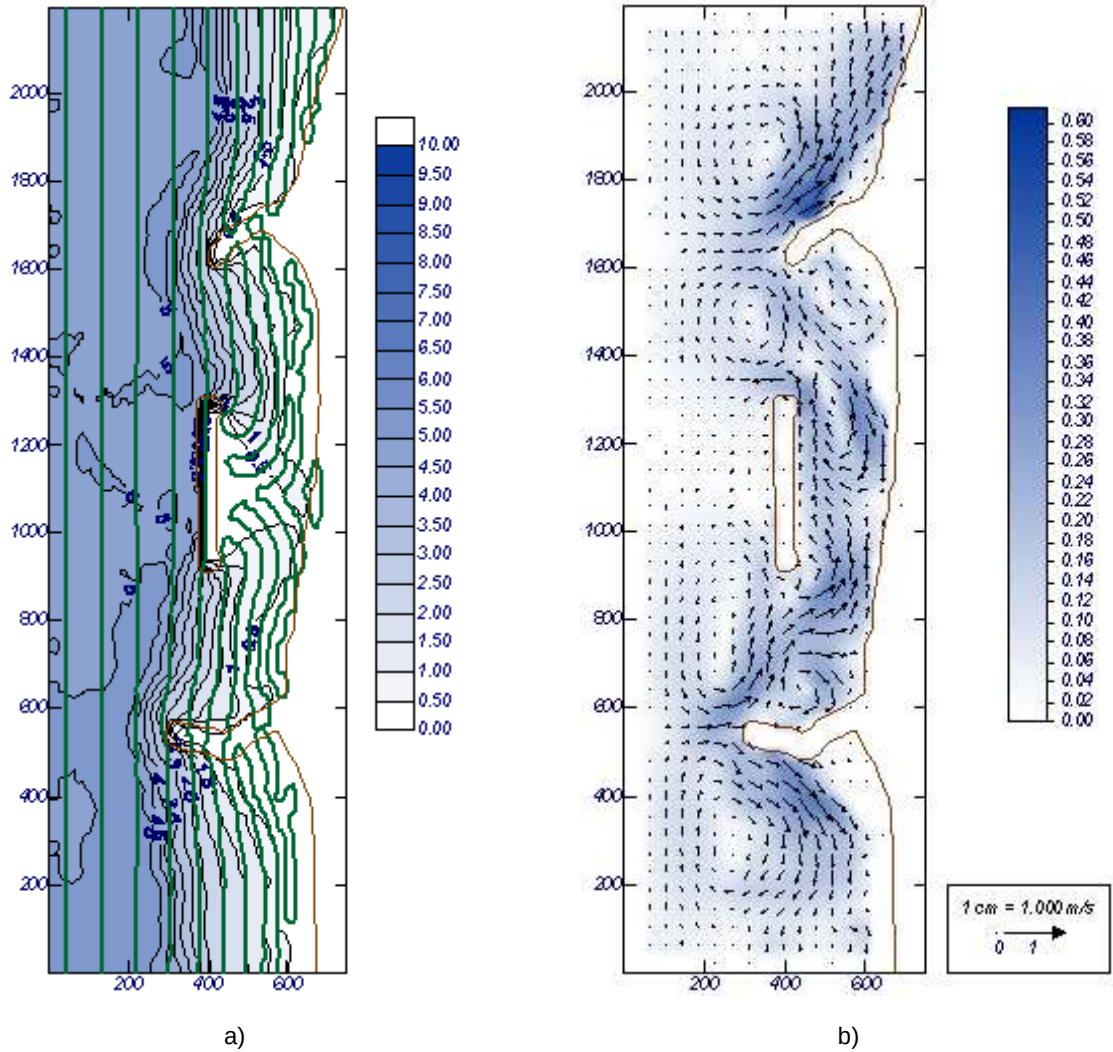


Figura B16 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

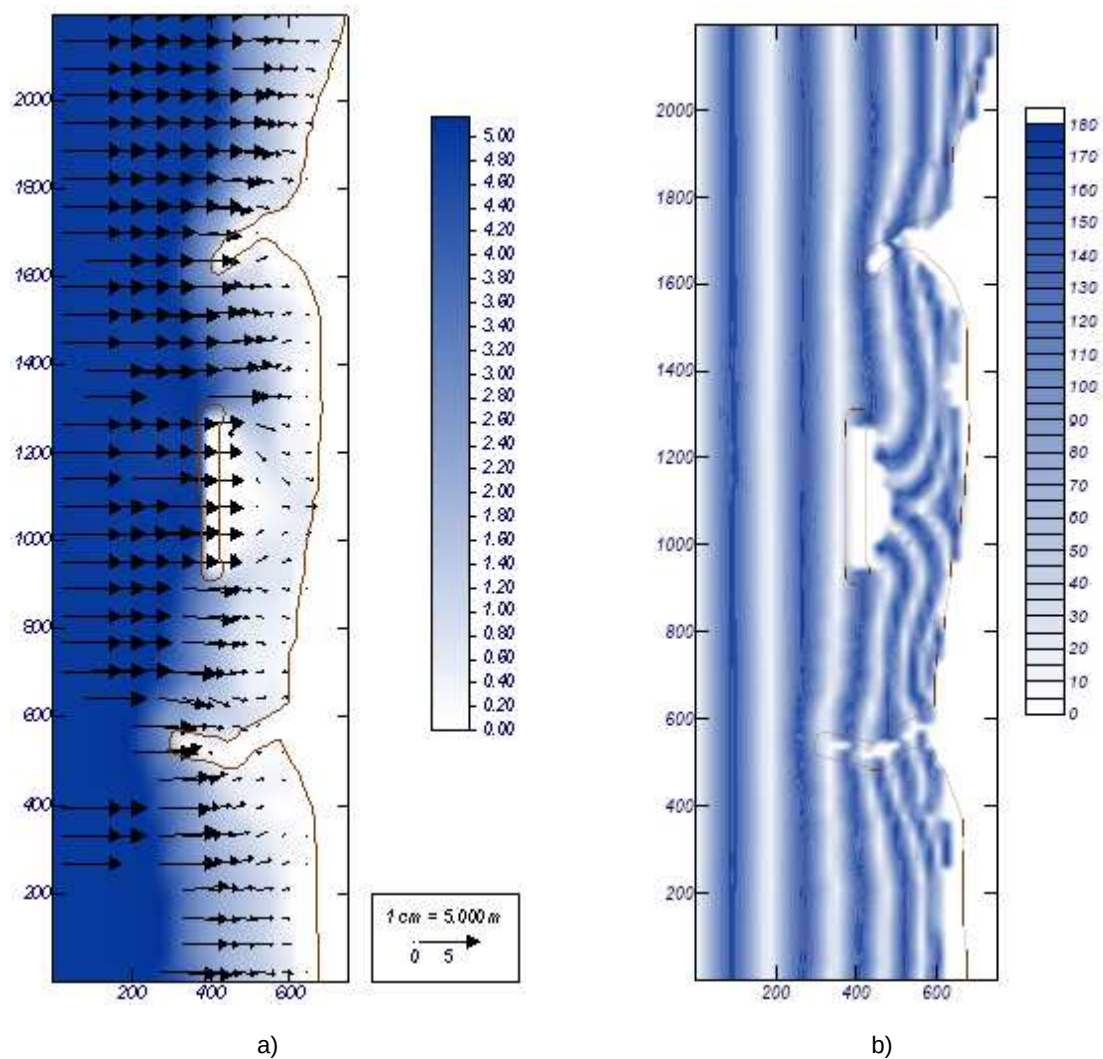


Figura B17 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

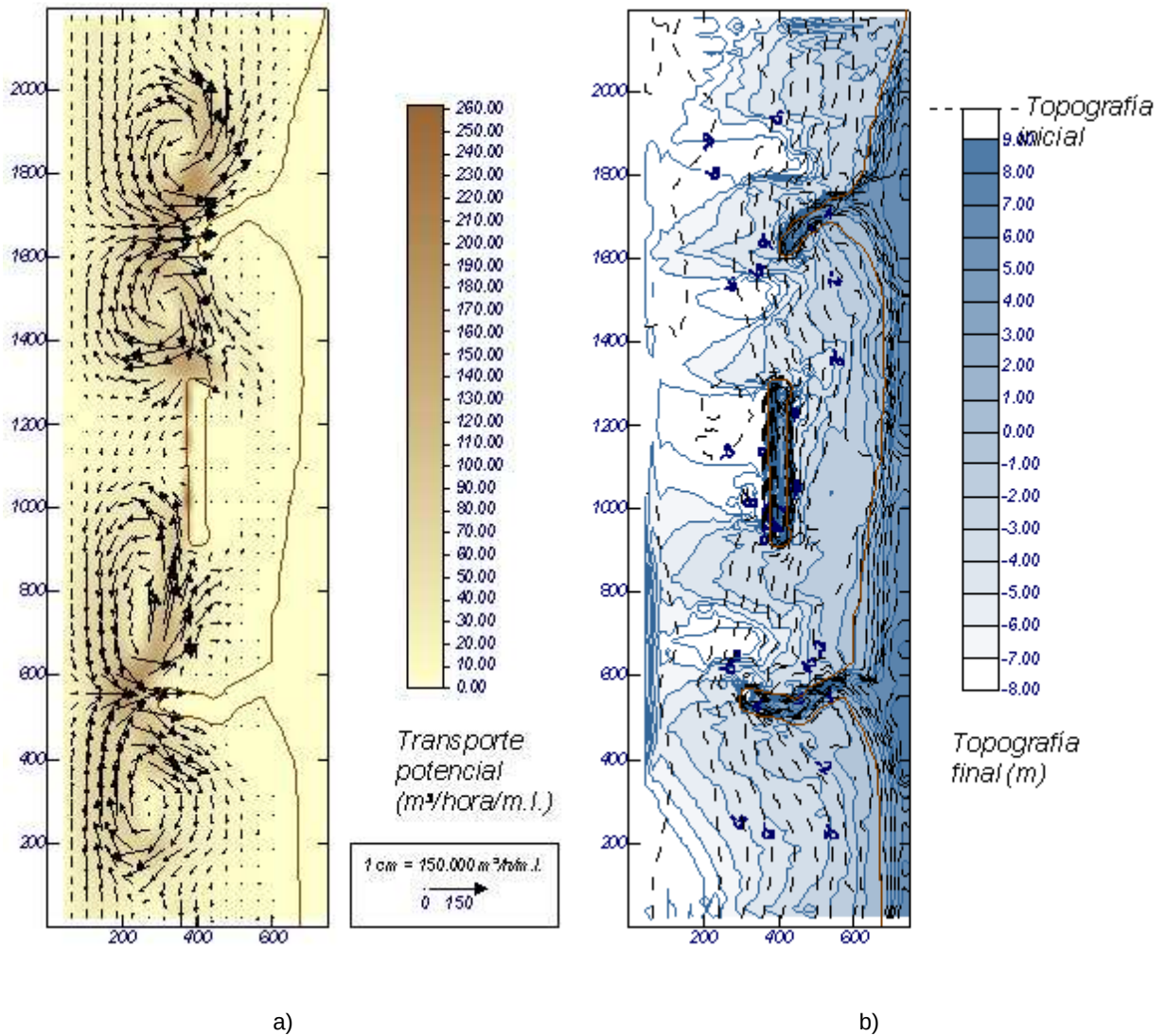


Figura B18 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

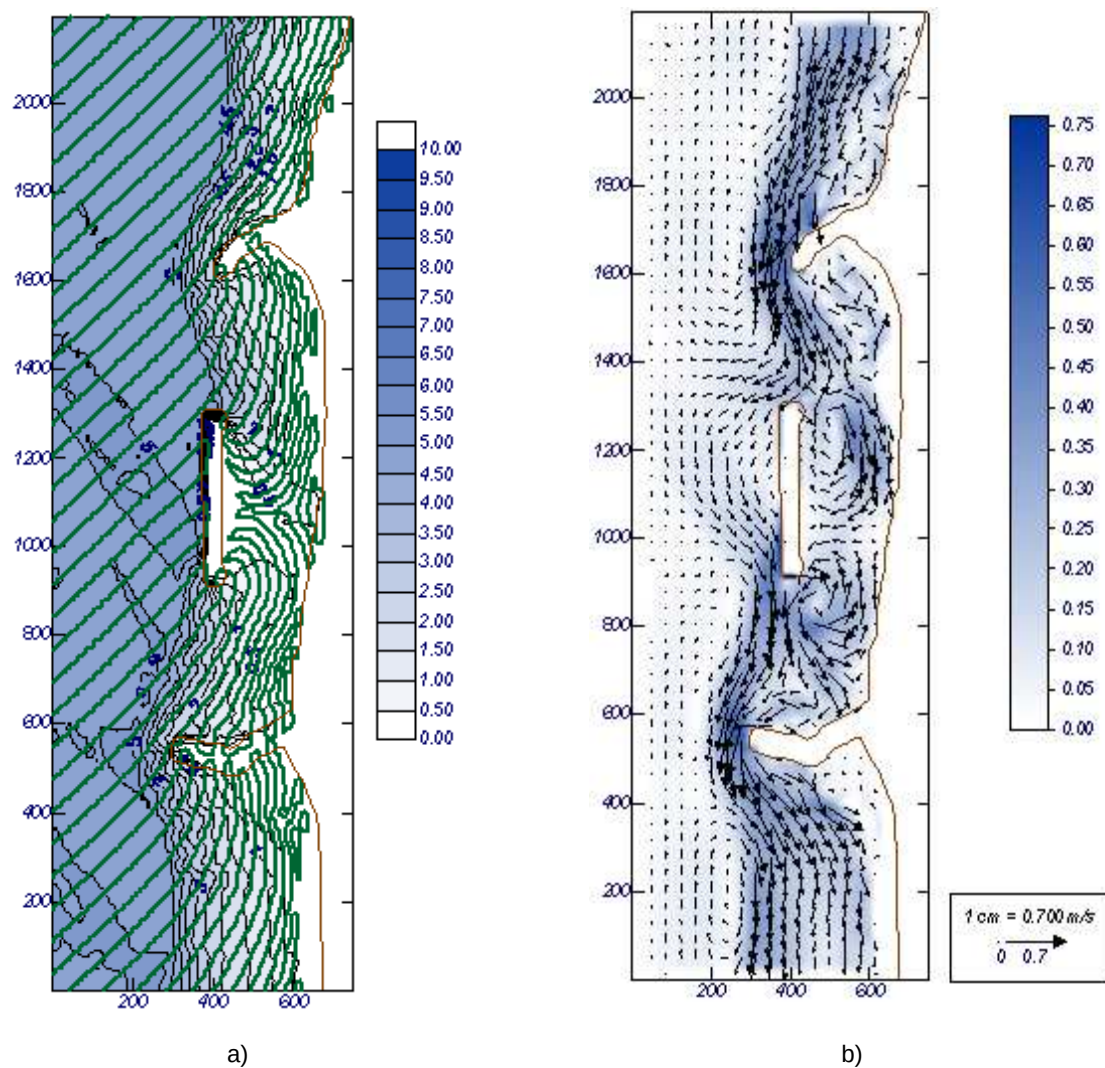


Figura B19 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectors corrente-magnitude, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

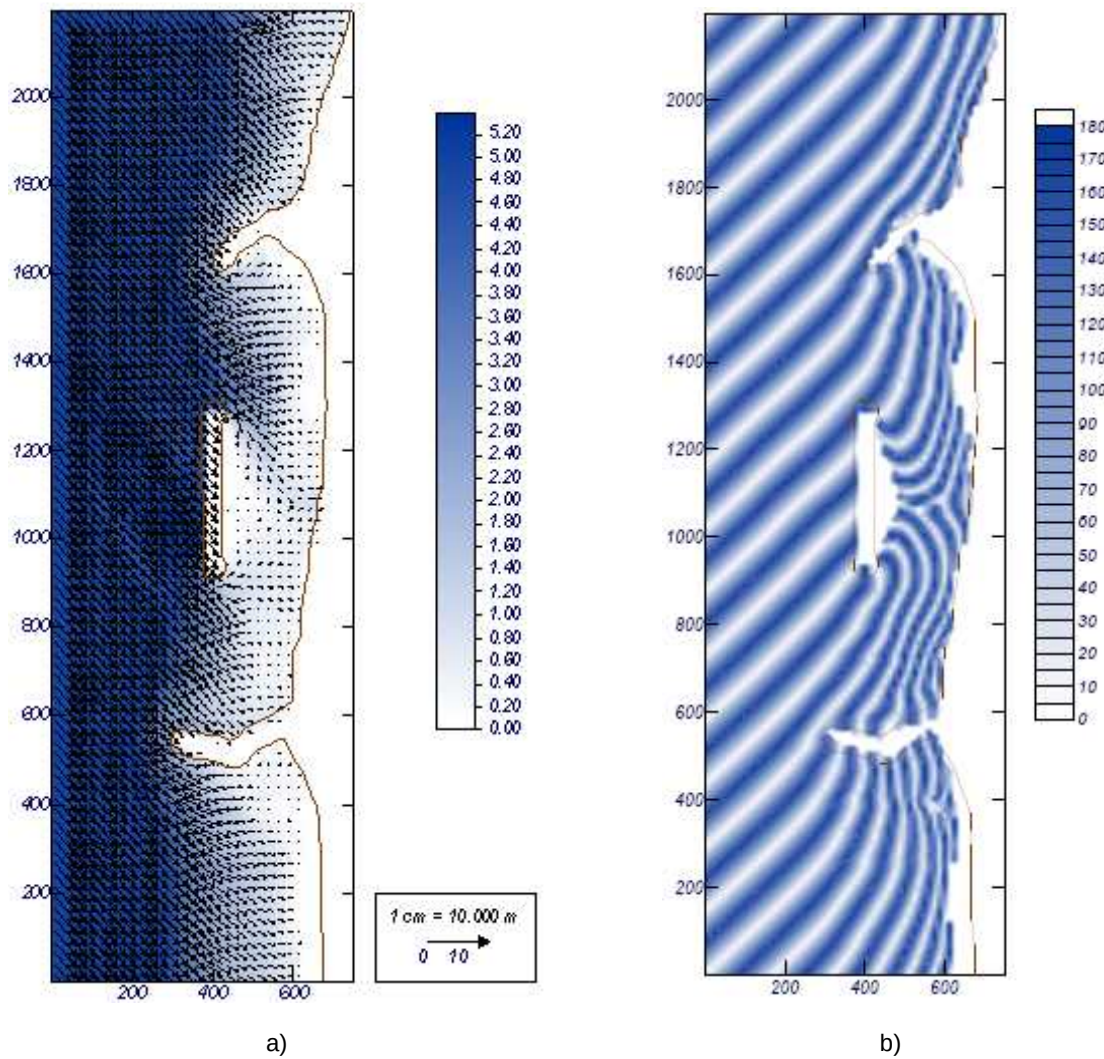


Figura B20 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

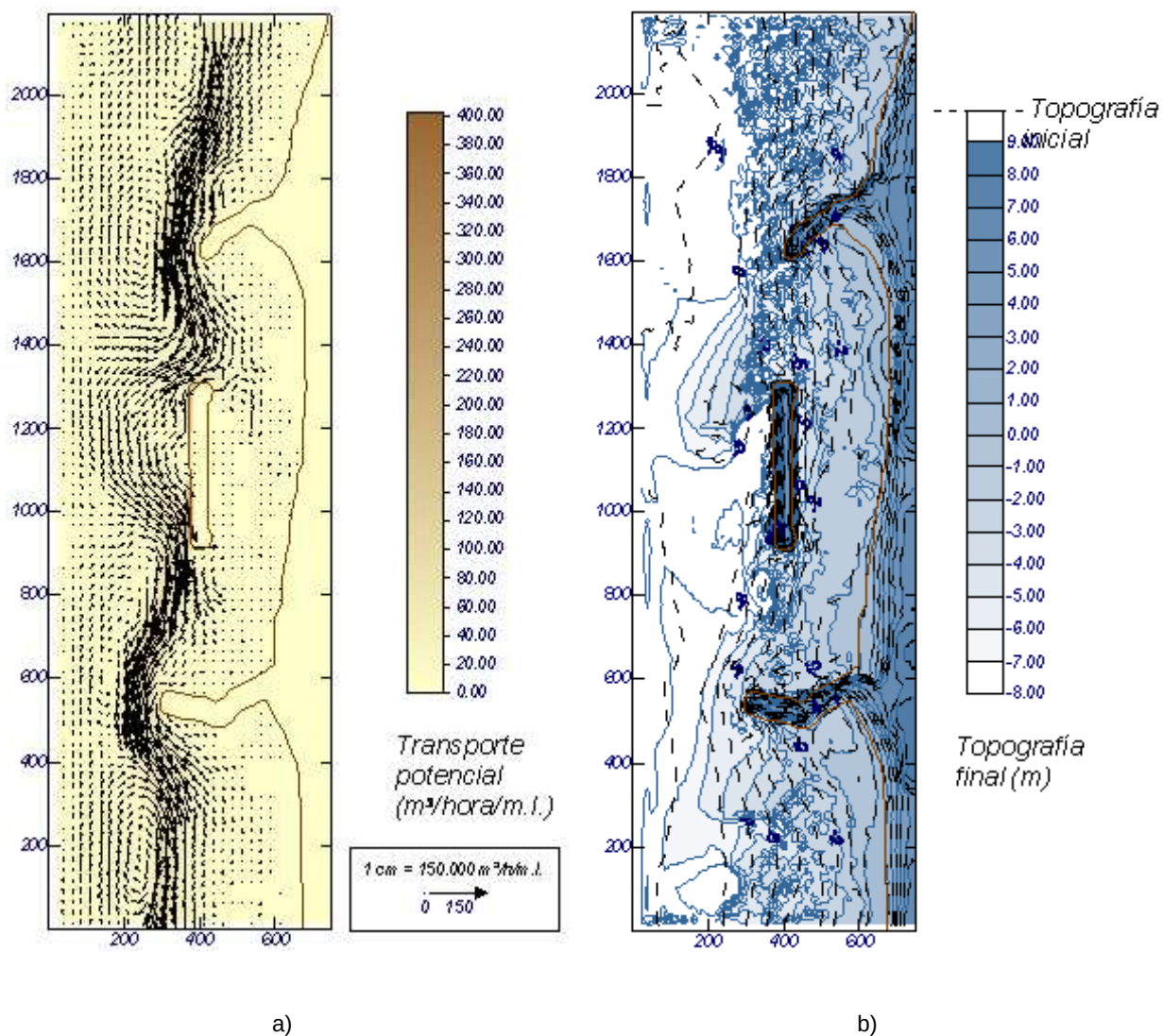


Figura B21 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

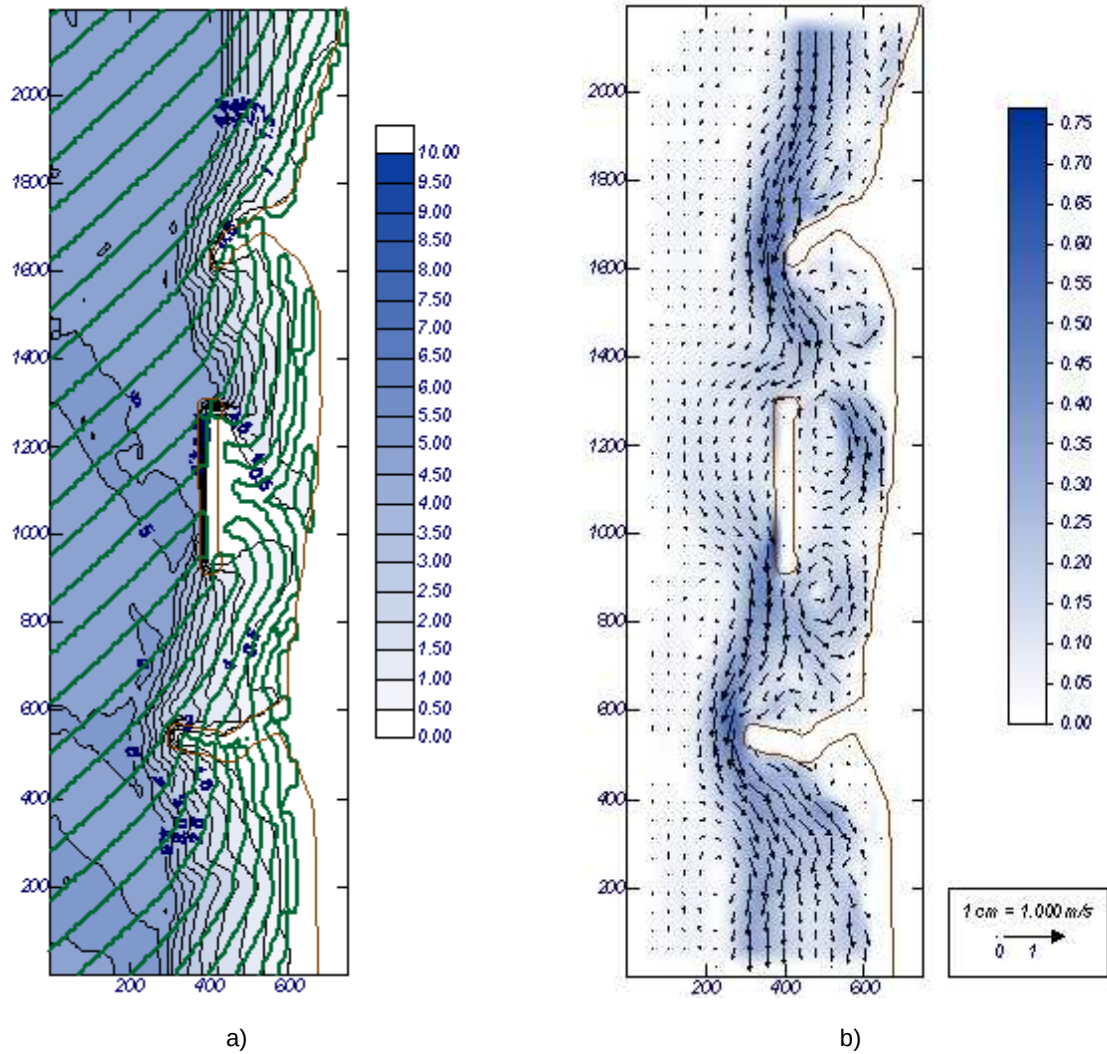


Figura B22 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de noroeste.

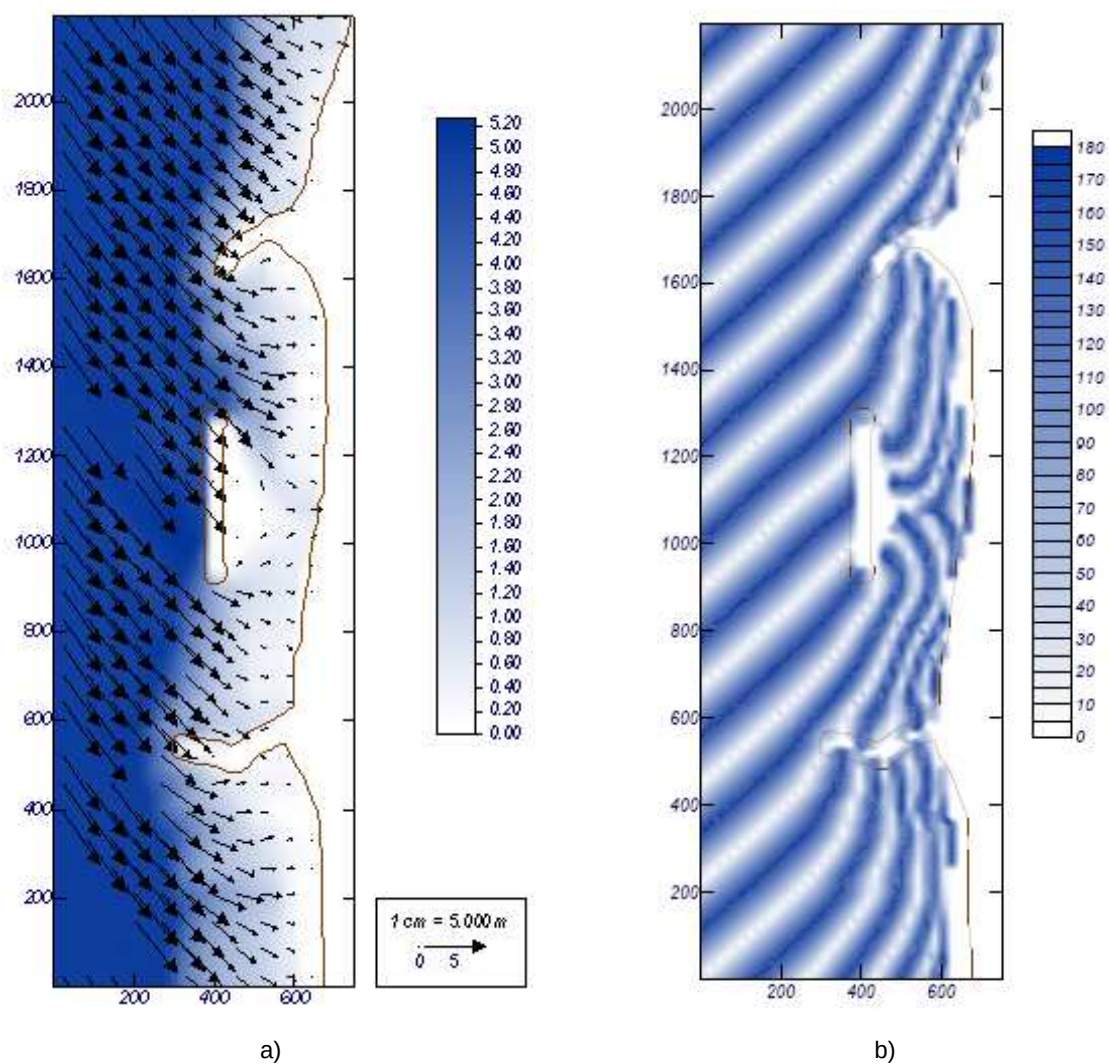


Figura B23 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de noroeste.

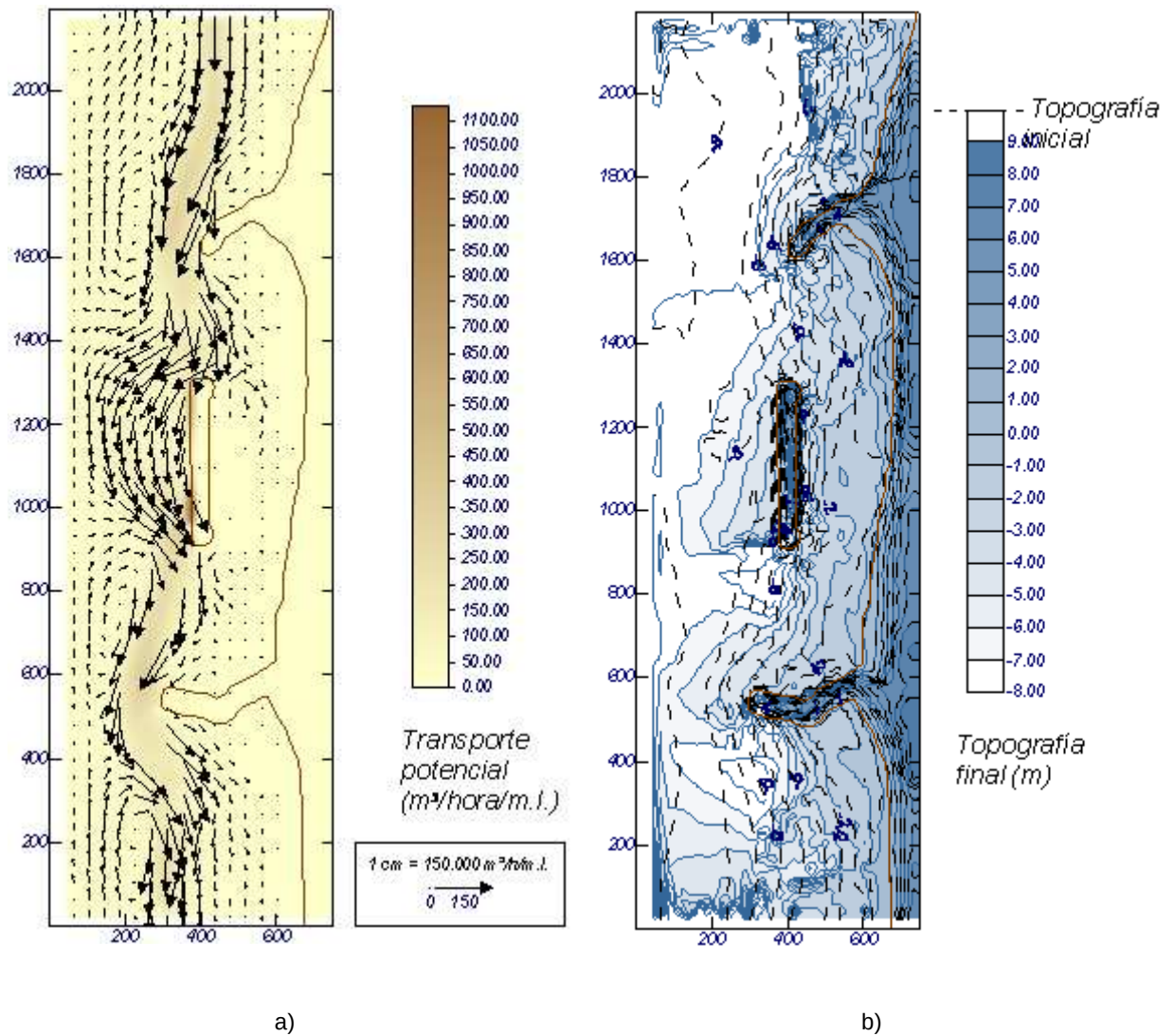


Figura B24 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré 0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de noroeste.

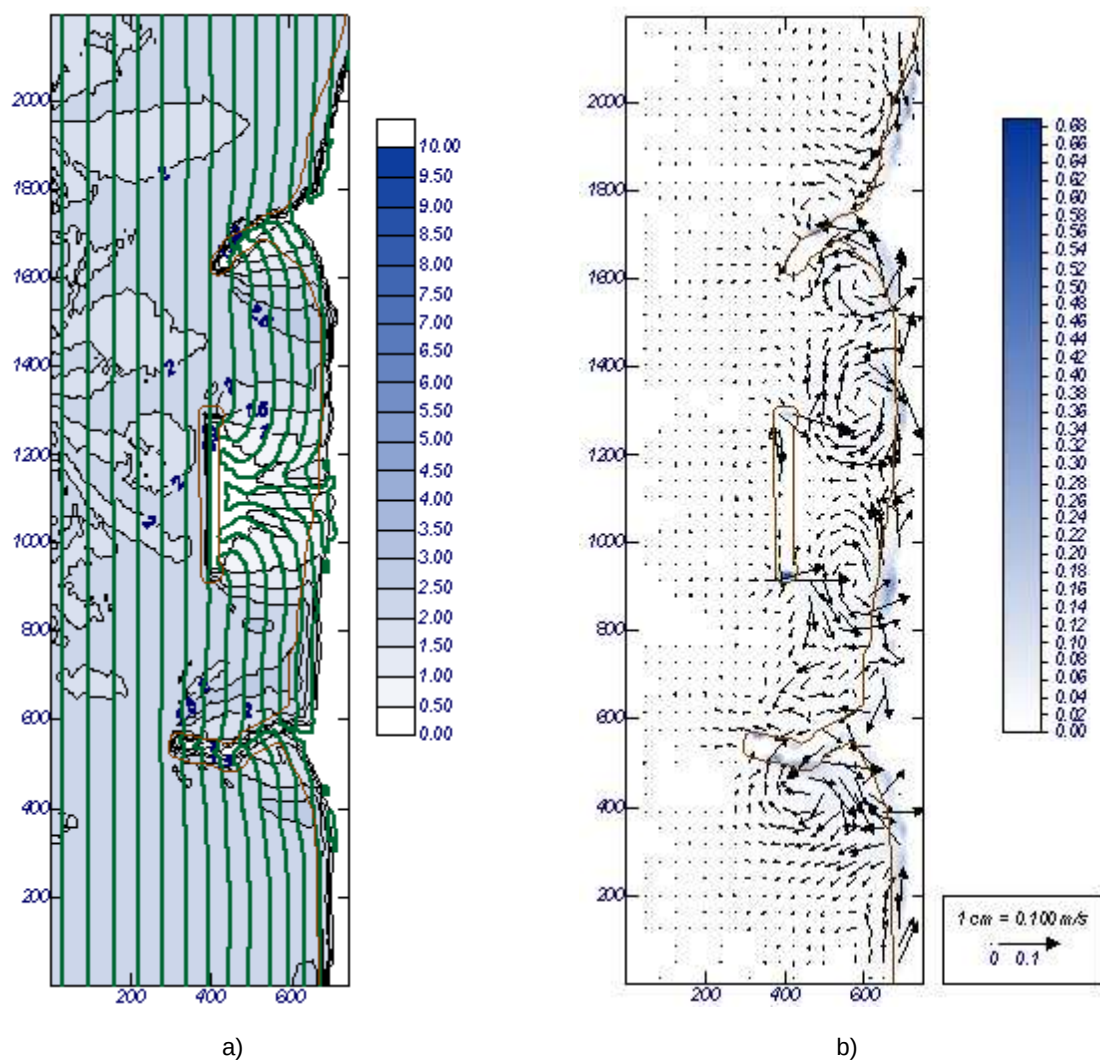


Figura B25 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

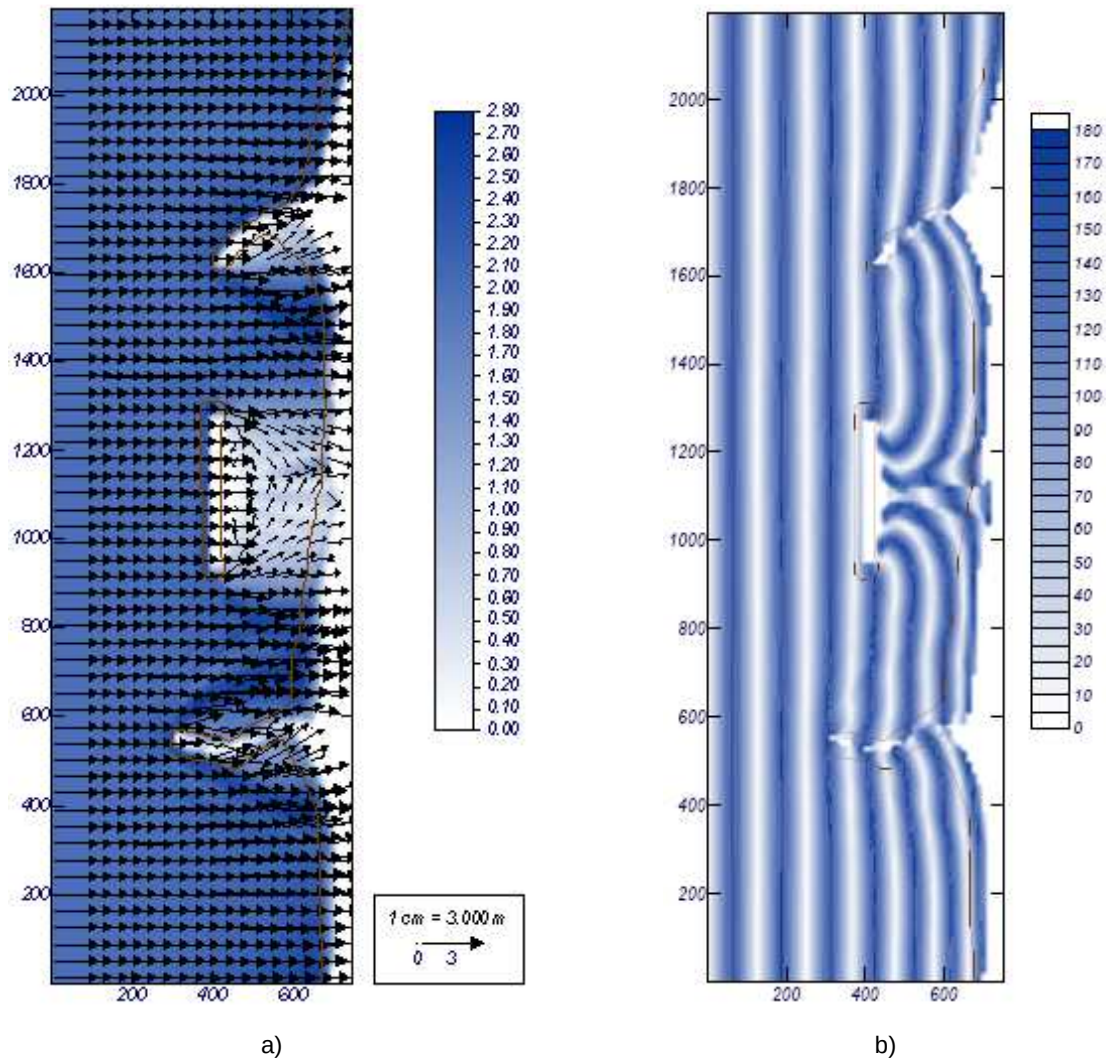


Figura B26 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

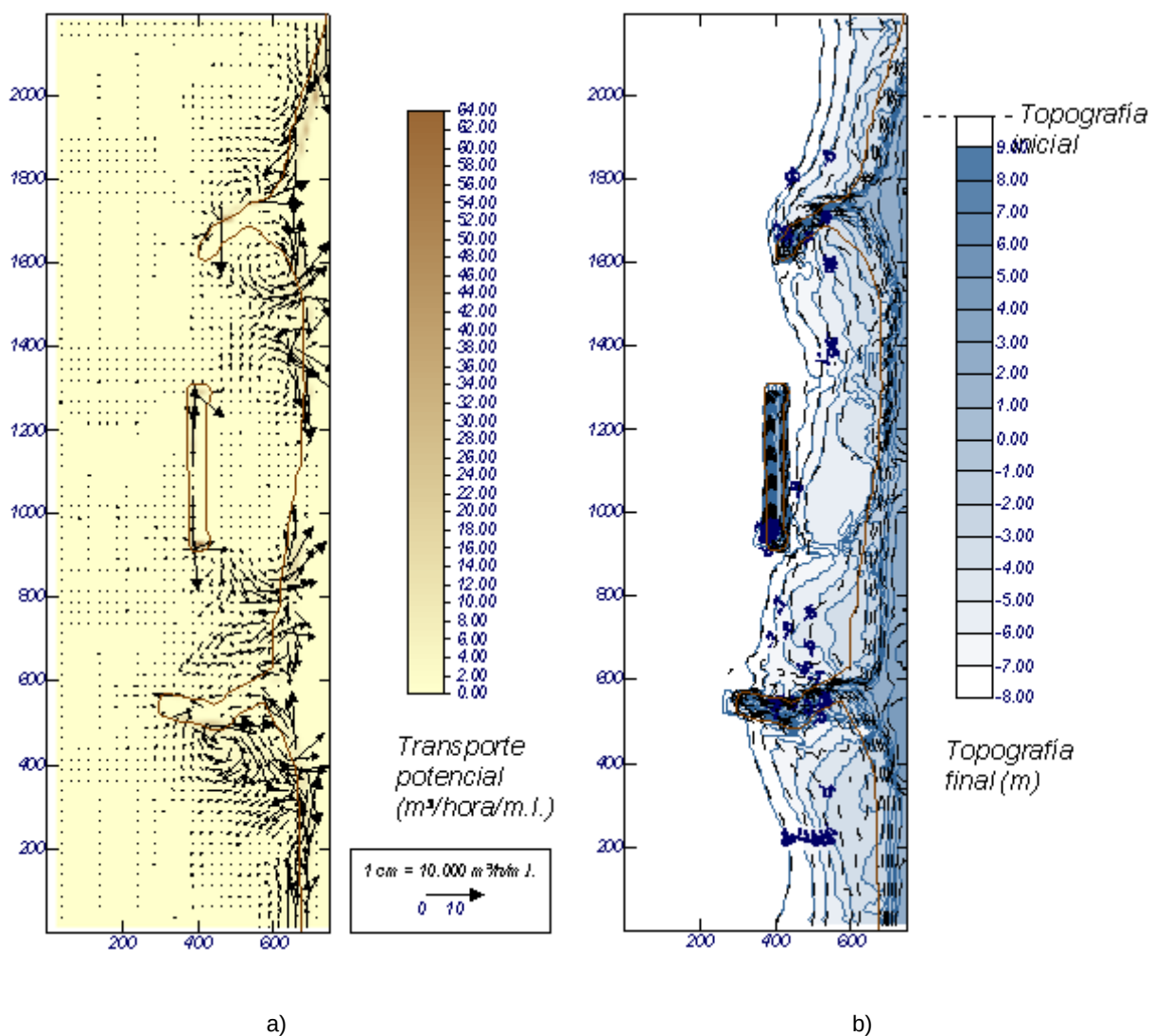


Figura B27 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

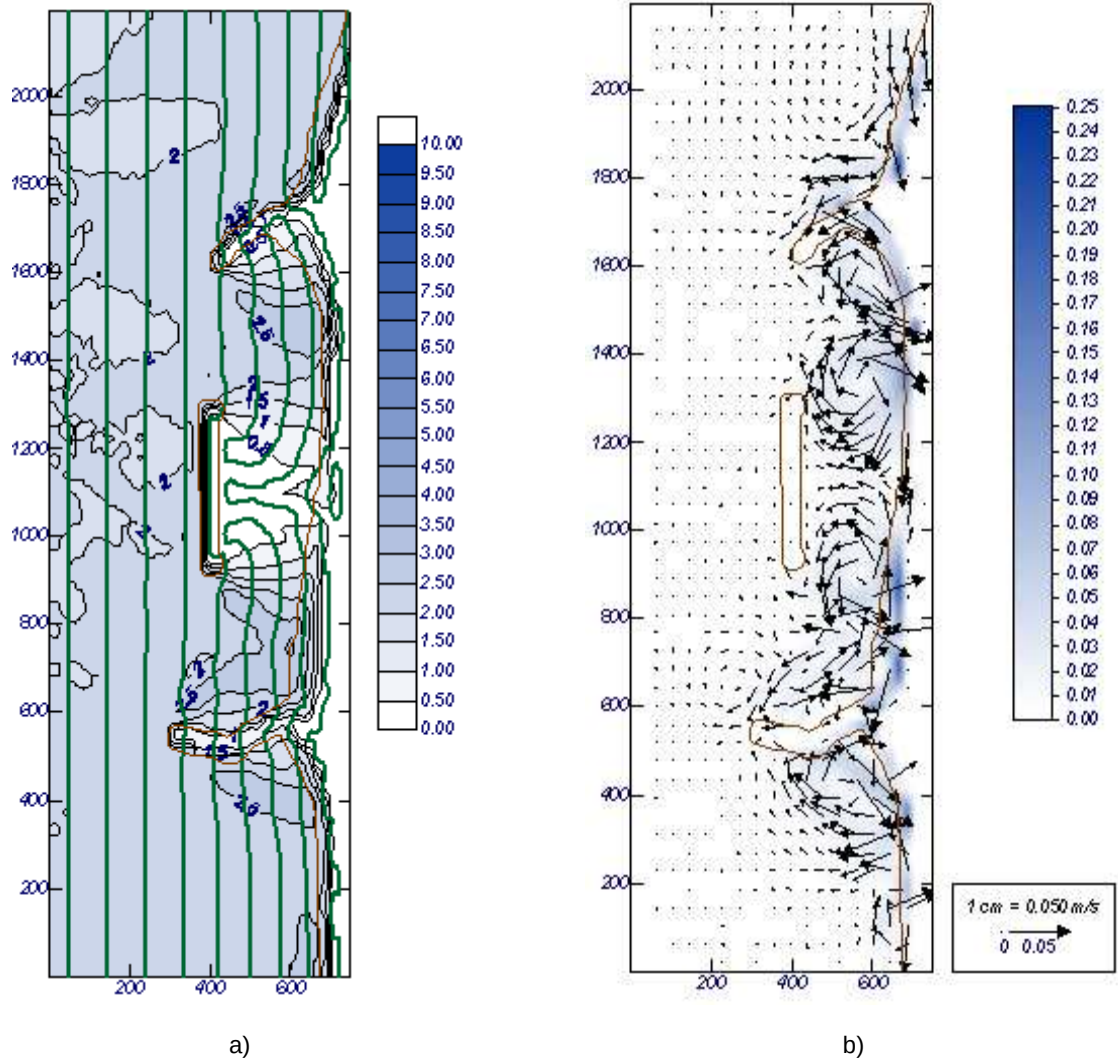


Figura B28 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

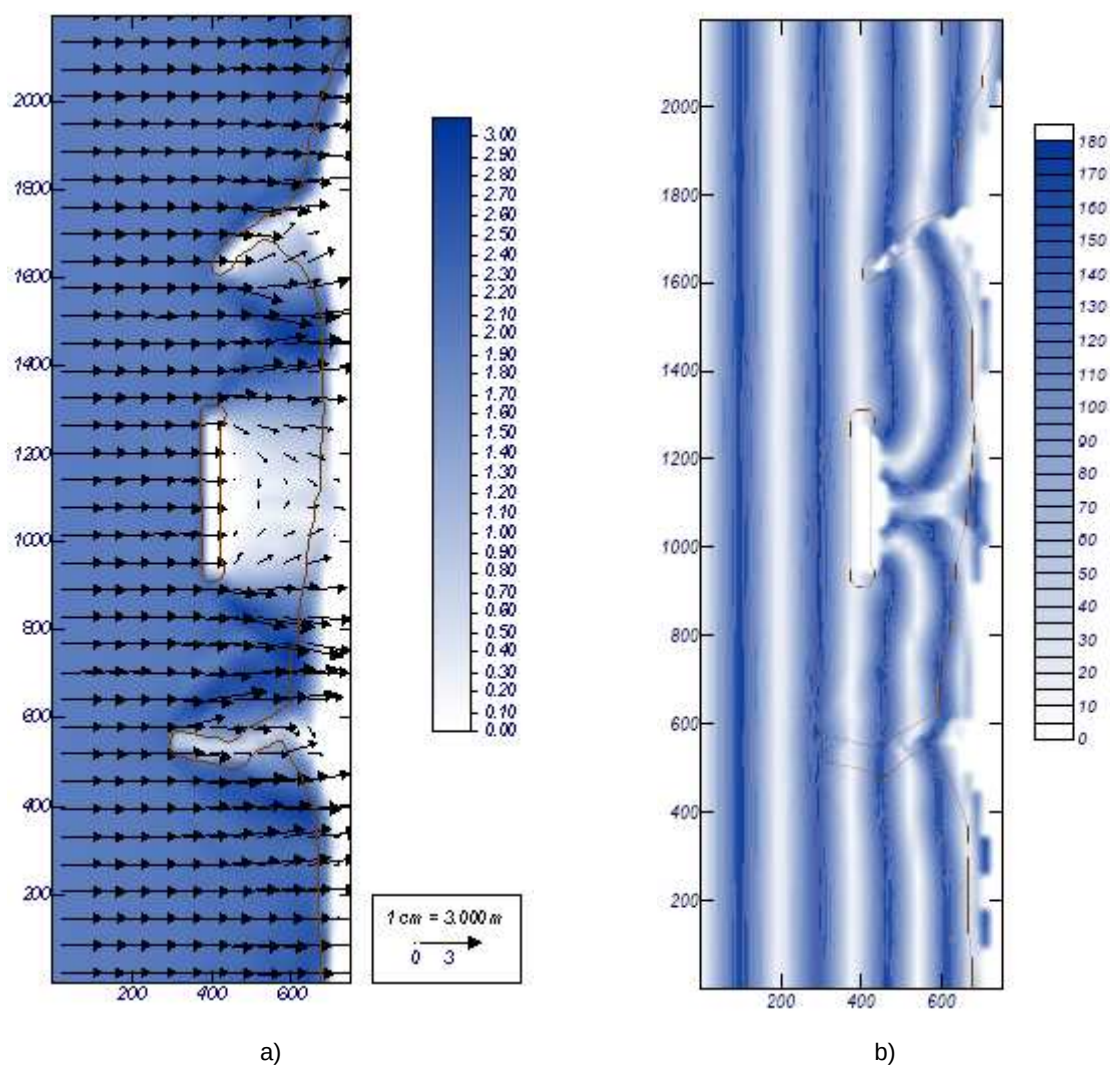


Figura B29 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

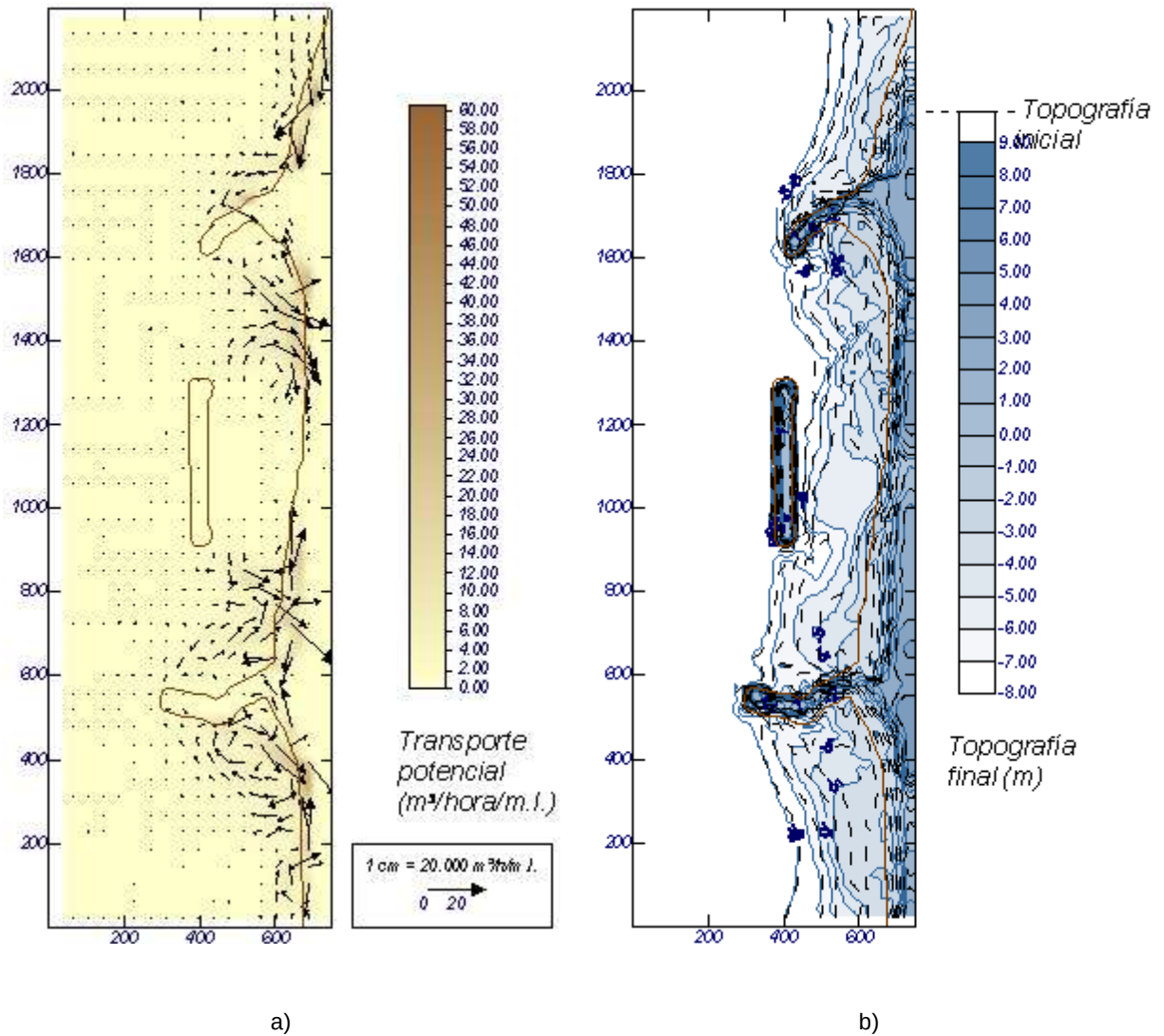


Figura B30 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de oeste.

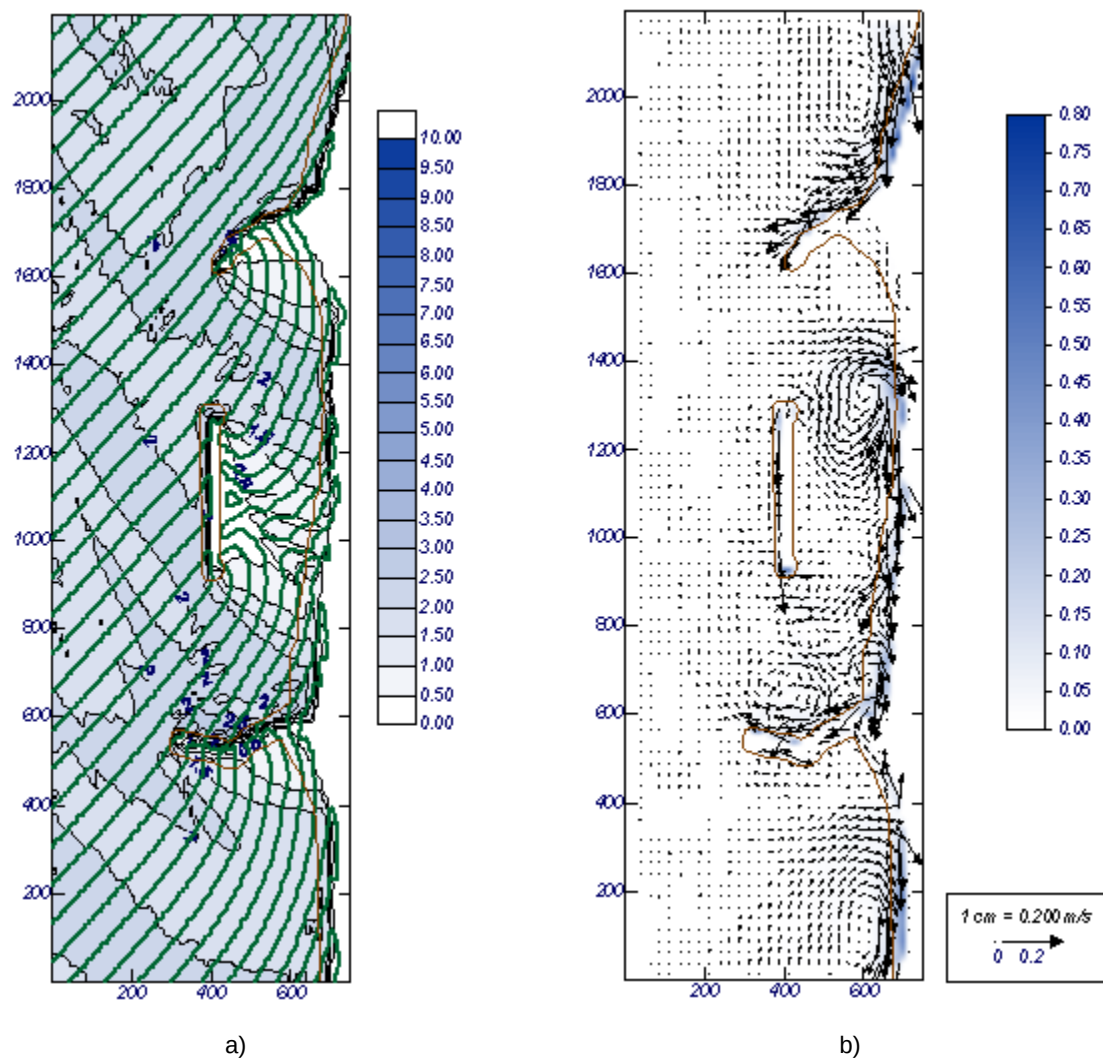


Figura B31 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

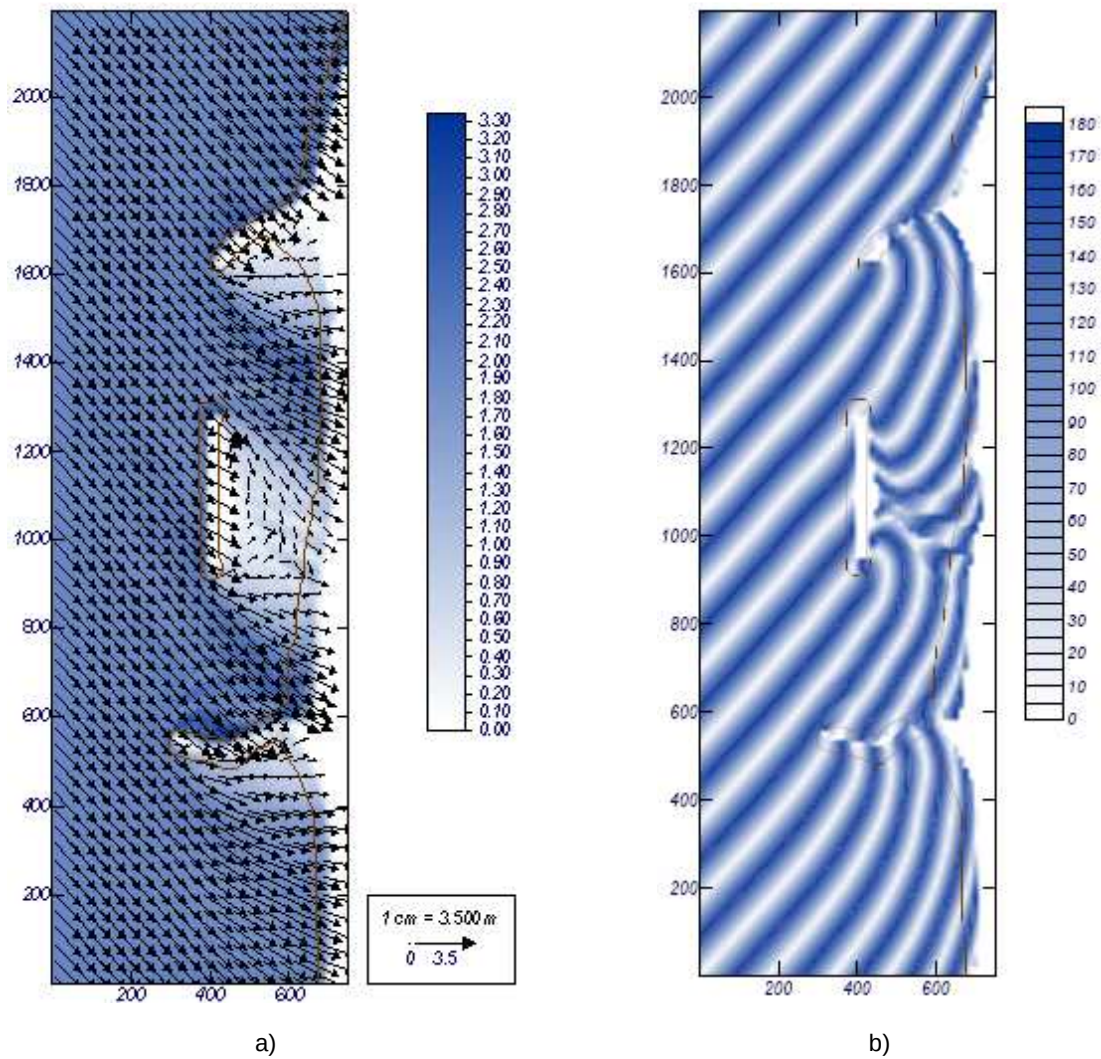


Figura B32 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

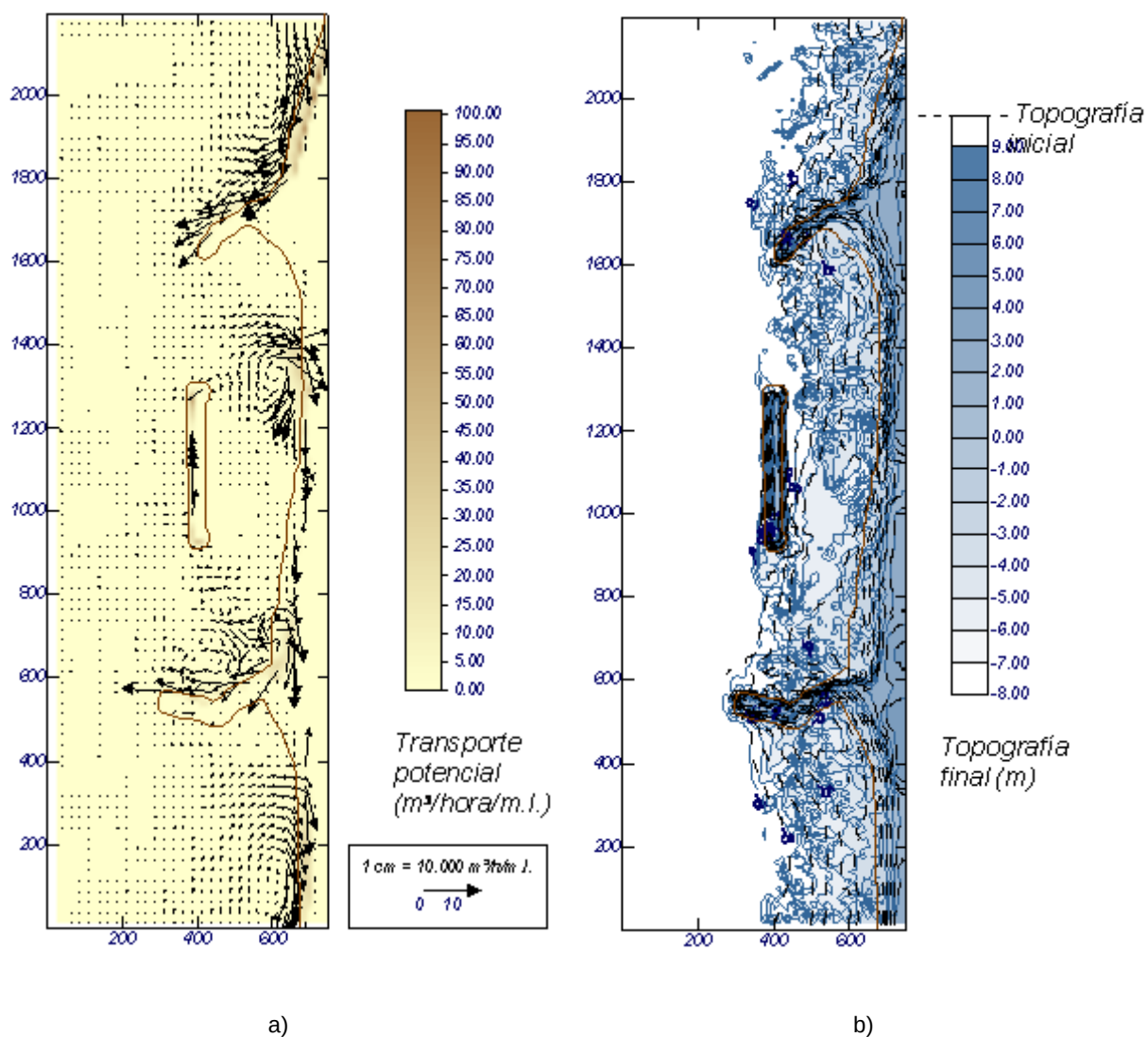


Figura B33 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

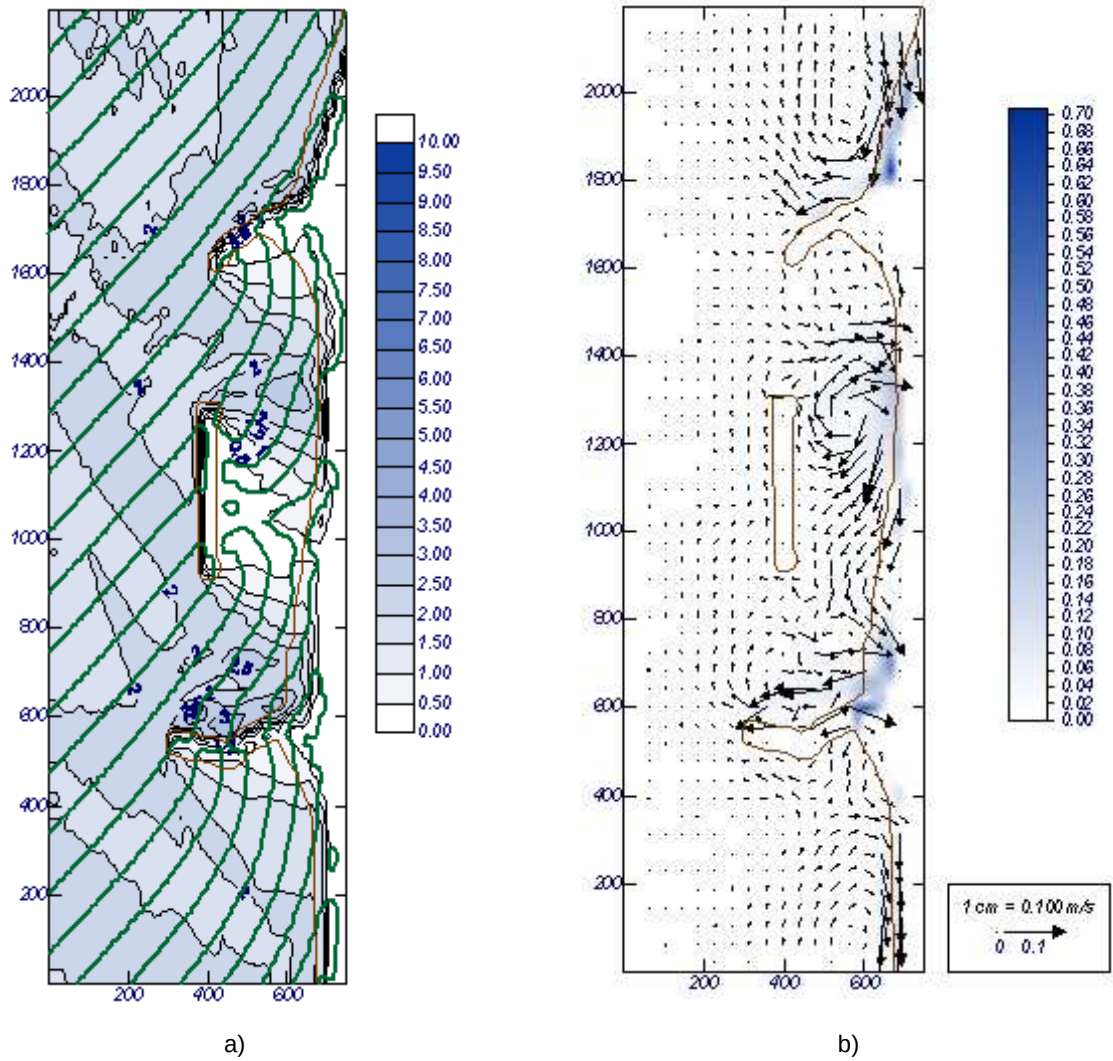


Figura B34 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de noroeste.

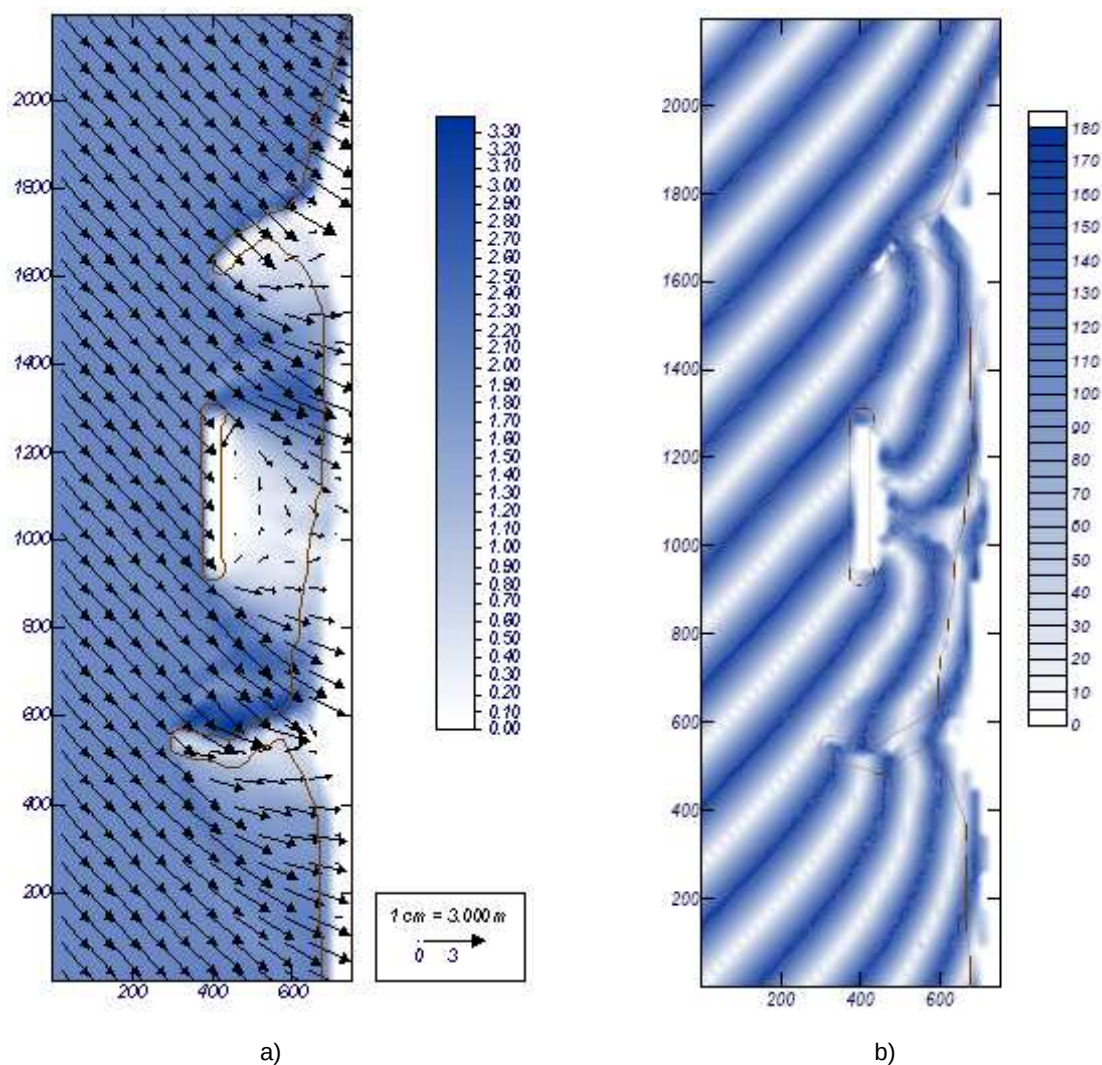


Figura B35 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de noroeste.

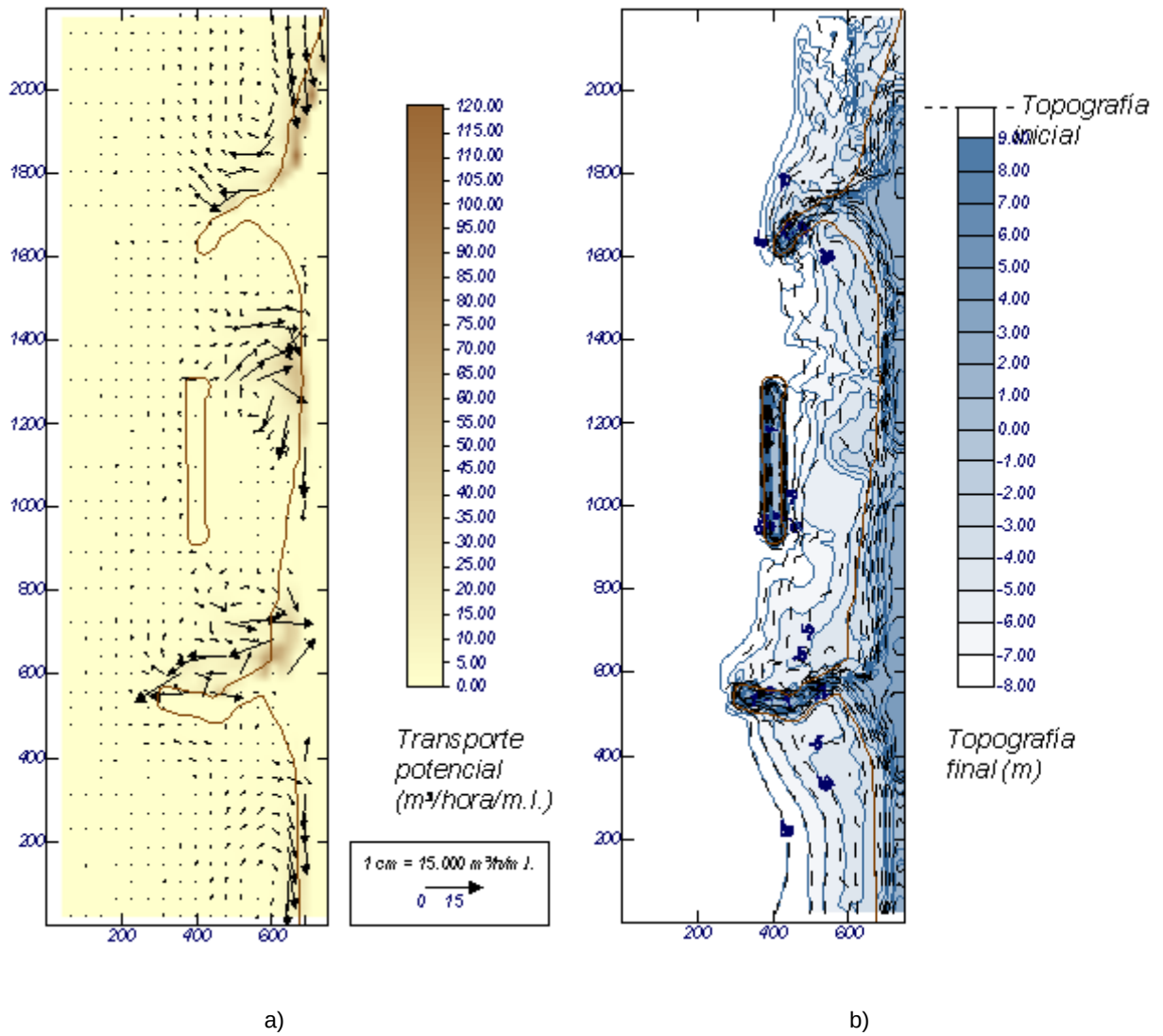


Figura B36 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 2m, período de onda de 18 s, orientação da agitação de noroeste.

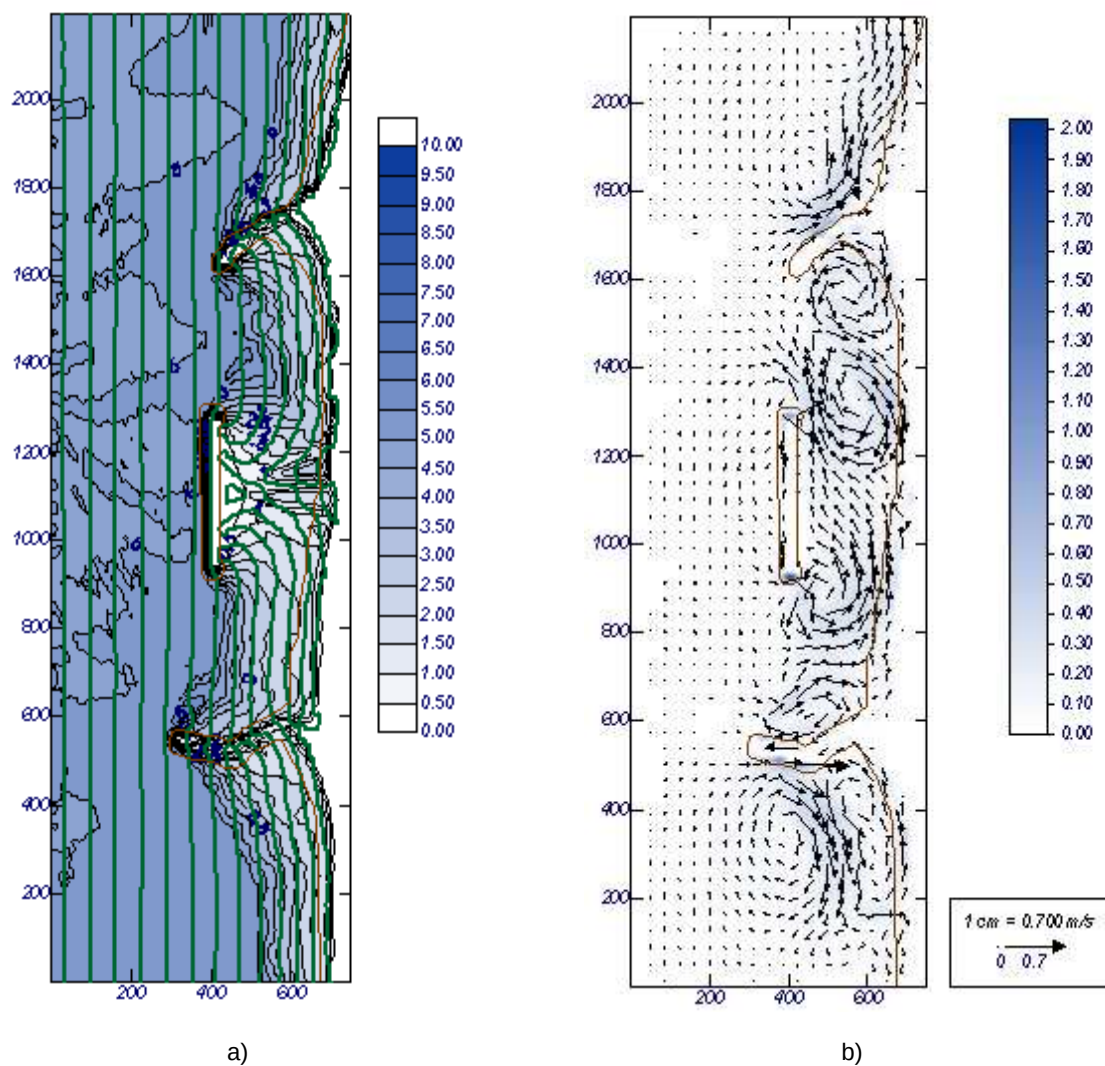


Figura B37 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

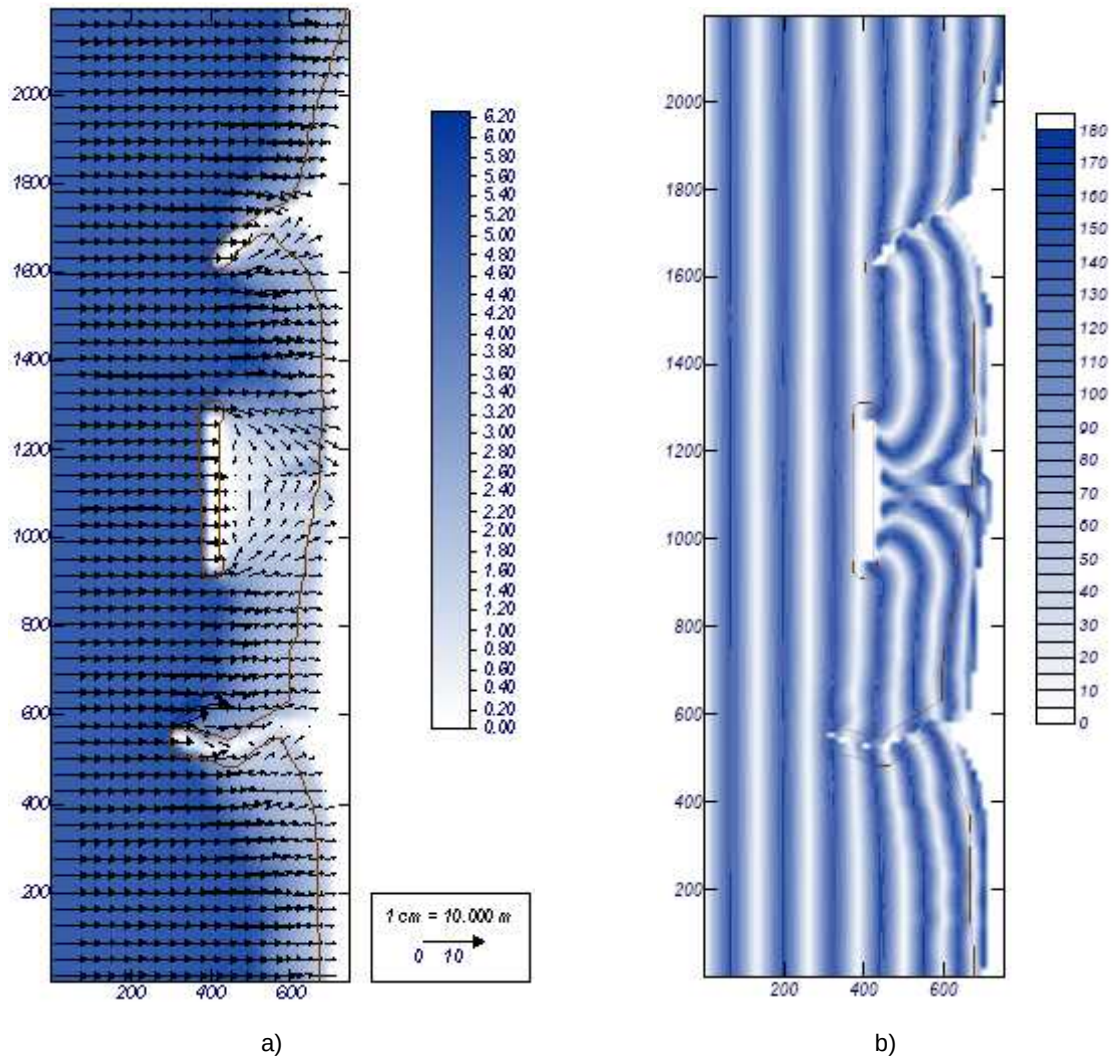


Figura B38 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

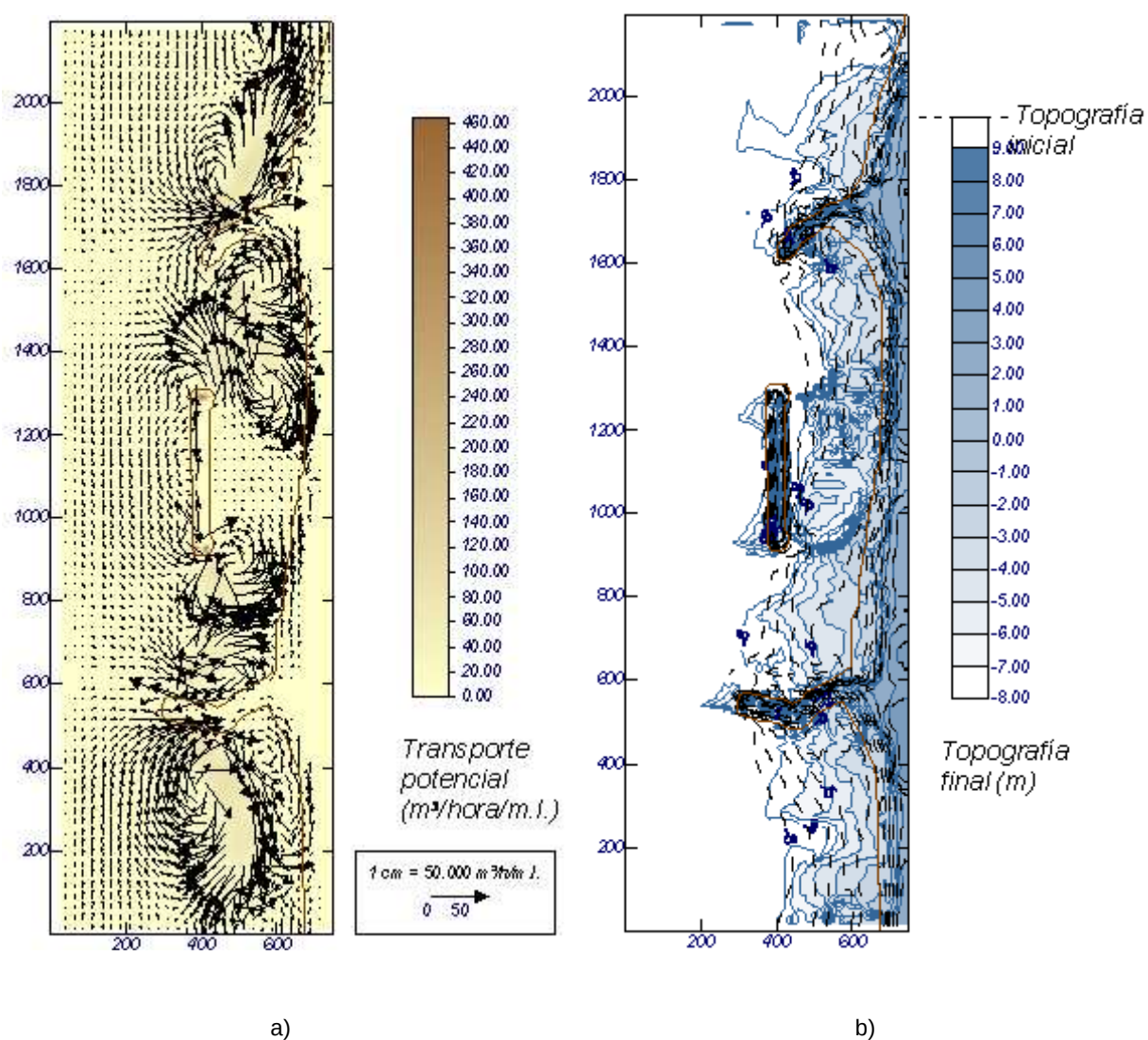


Figura B39 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de oeste.

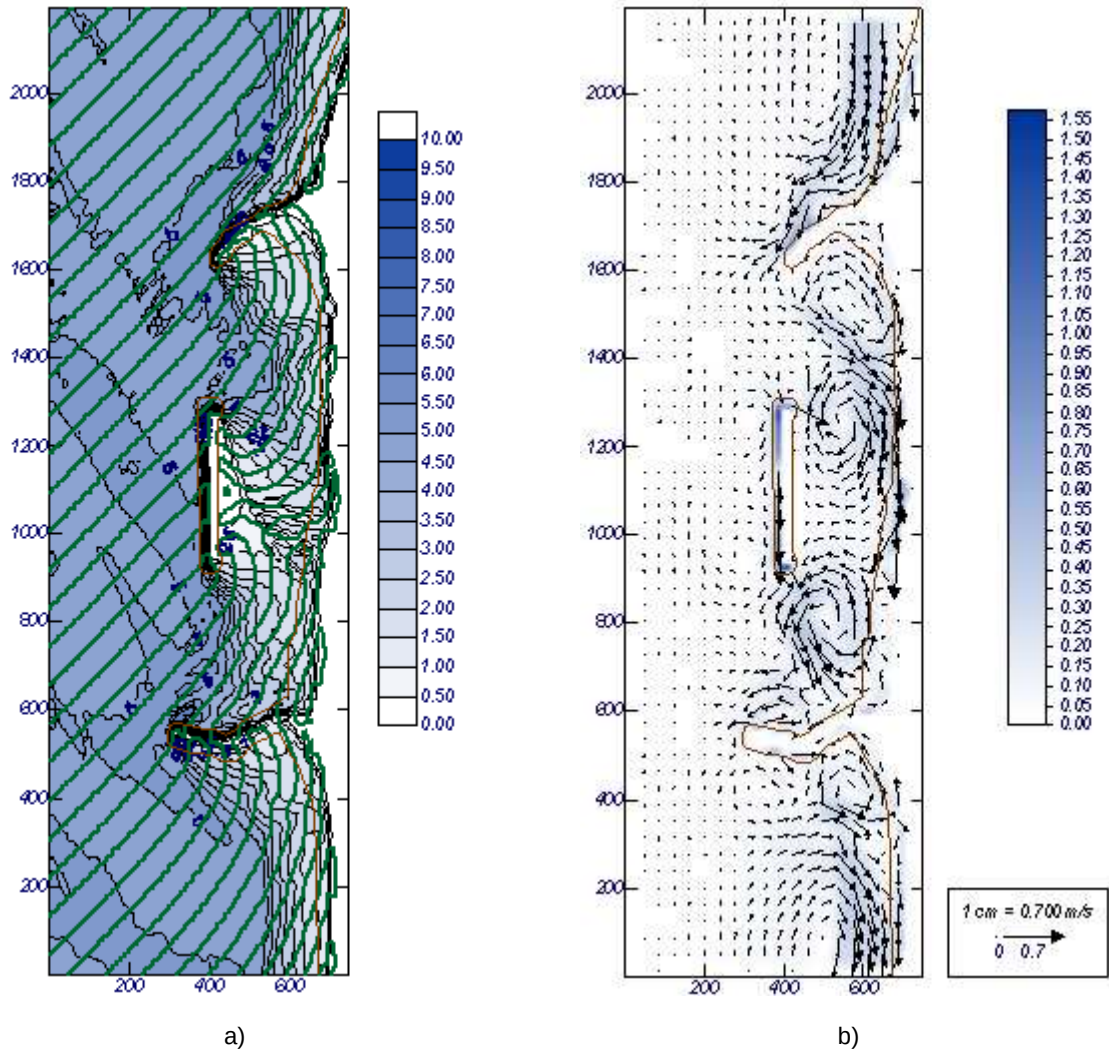


Figura B40 - a) Alturas de onda-frentes de onda, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

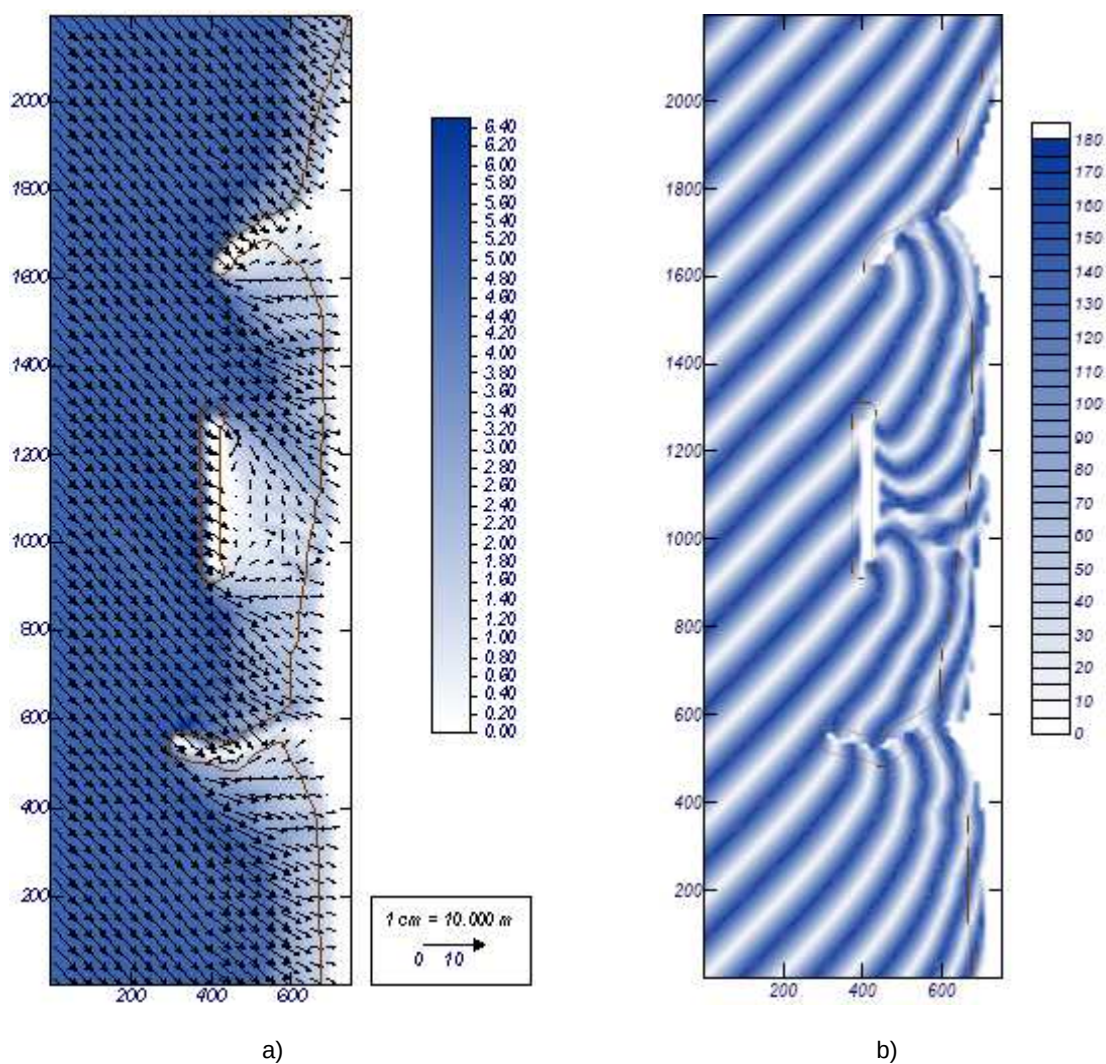


Figura B41 - a) Vectores agitação-magnitude, b) Distribuição espacial da fase da onda, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

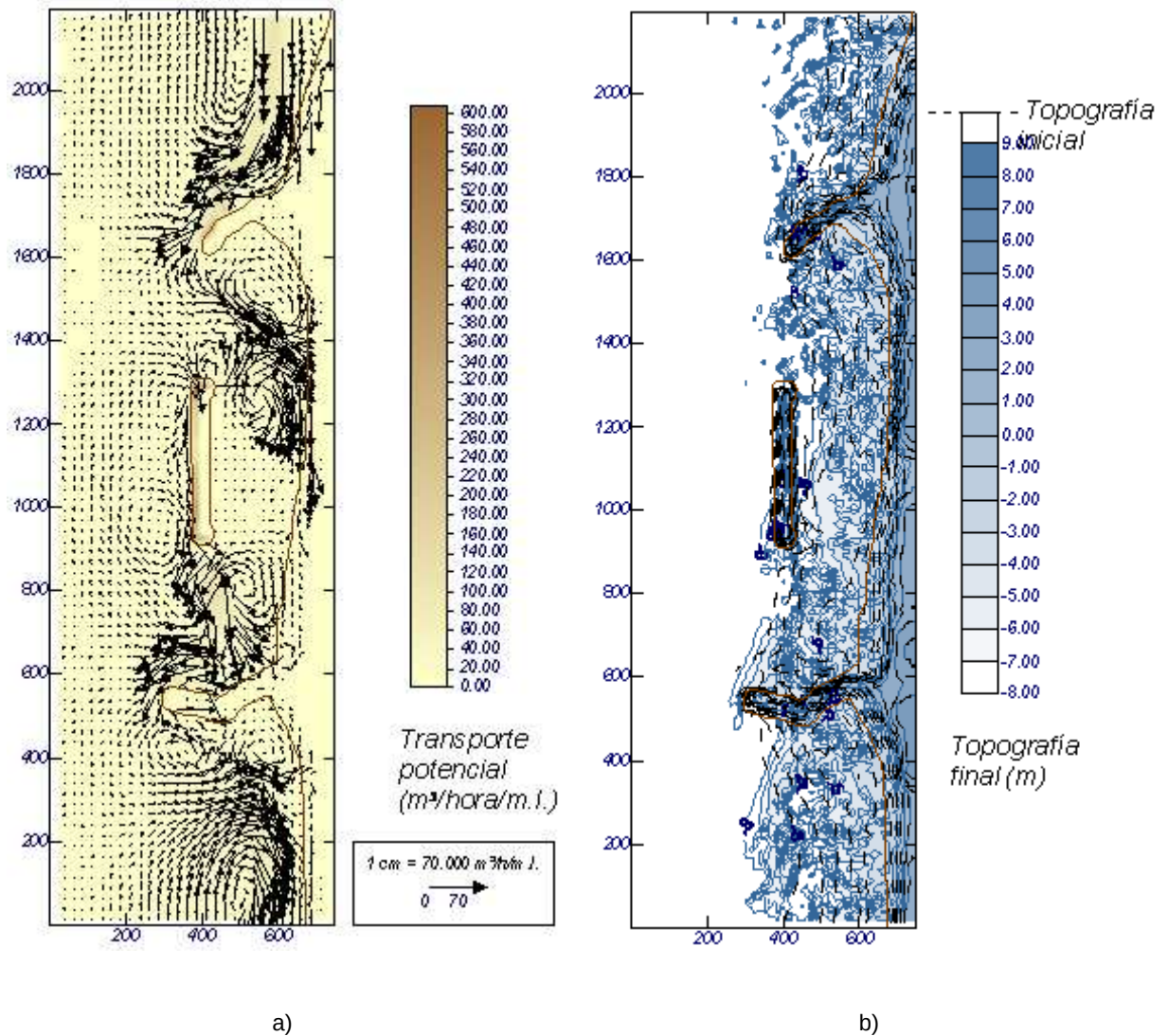


Figura B42 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: nível de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda de 5 m, período de onda de 12 s, orientação da agitação de noroeste.

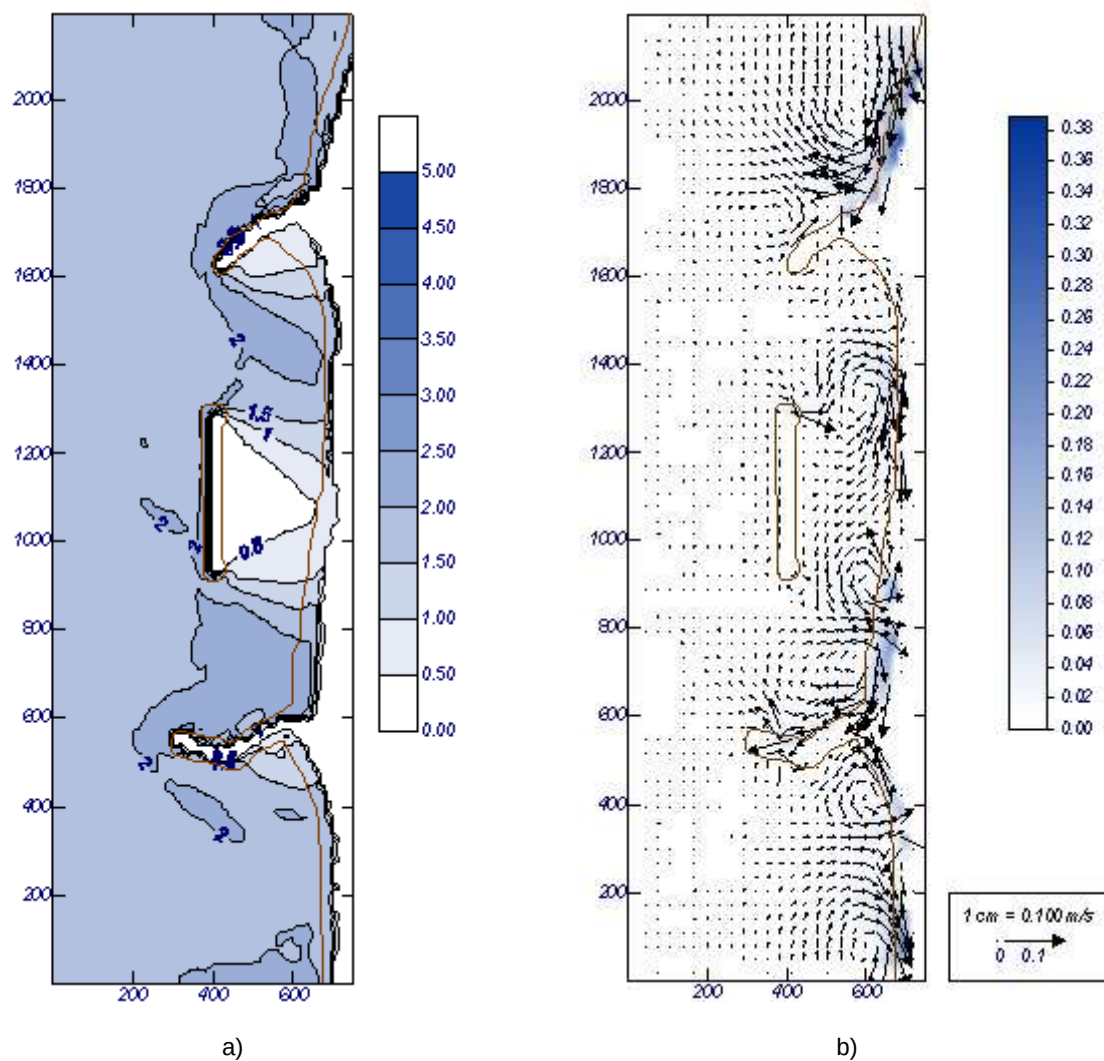


Figura B43 - a) Alturas de onda significativa, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: amplitude de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda significativa de 2 m, período de pico de 12 s, espectro direccional N65°W (+/-25°)

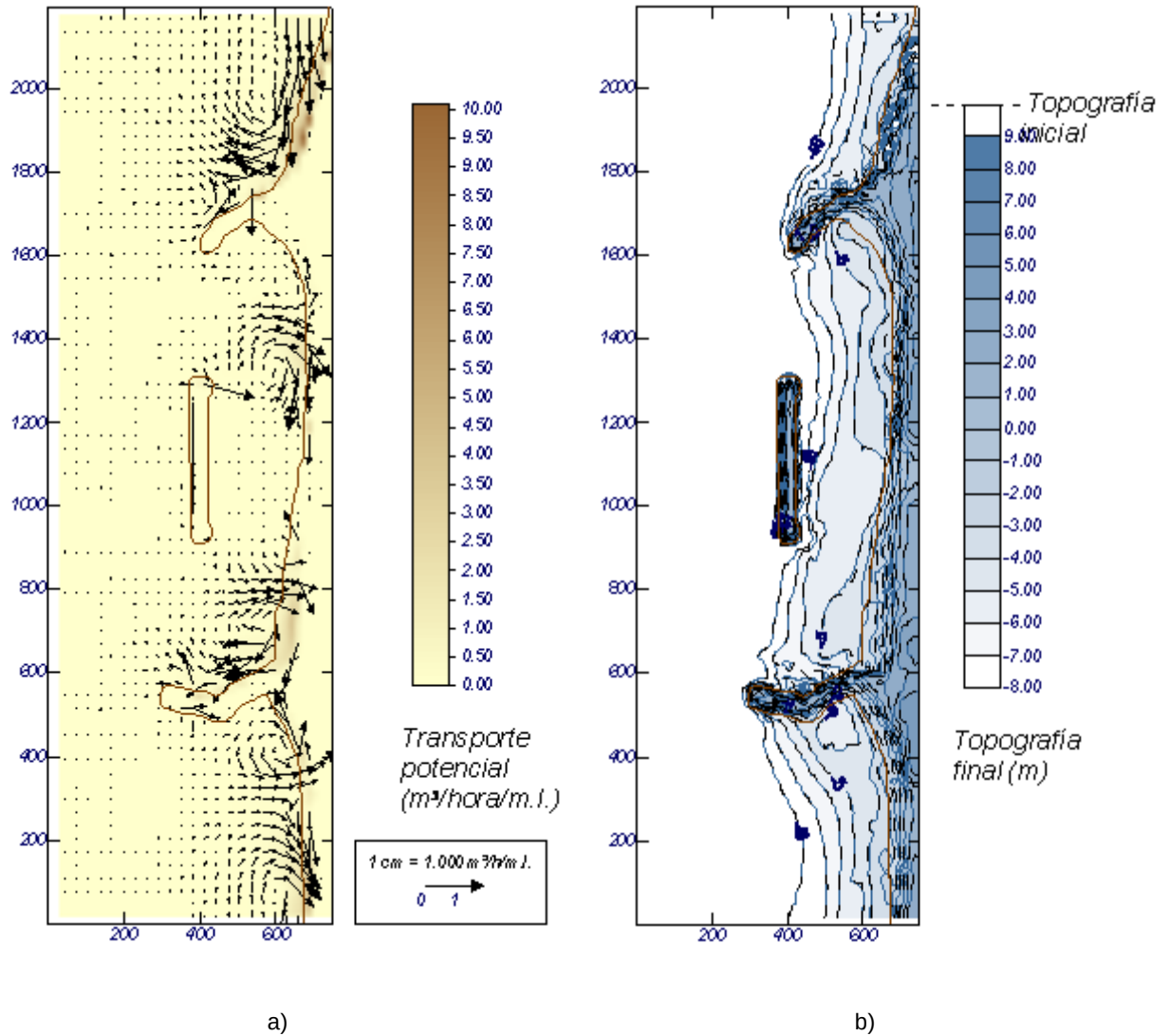


Figura B44 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: amplitude de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda significativa de 2 m, período de pico de 12 s, espectro direccional N65°W (+/- 25°)

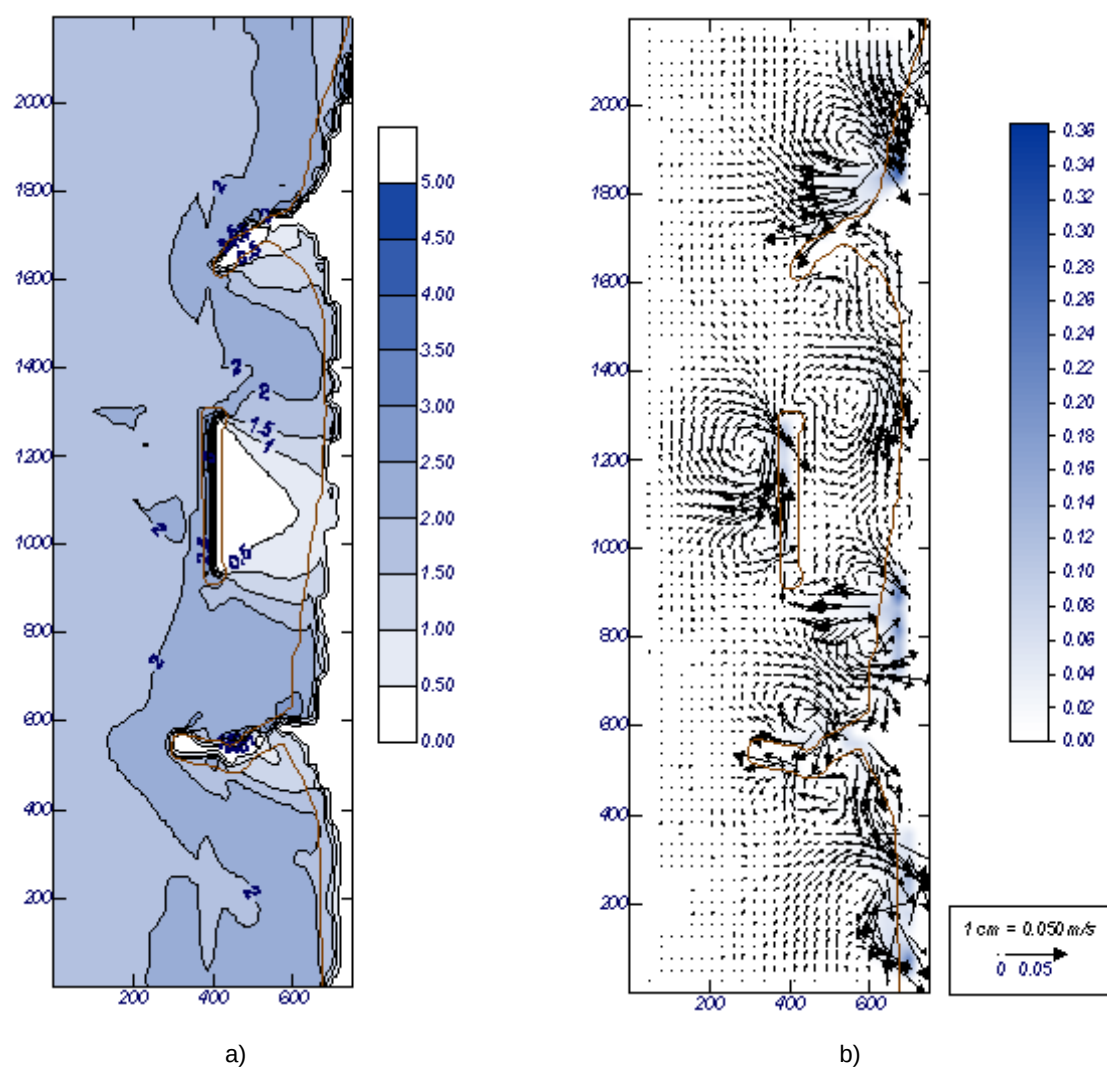


Figura B45 - a) Alturas de onda significativa, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: amplitude de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda significativa de 2 m, período de pico de 18 s, espectro direccional N65°W (+/-25°)

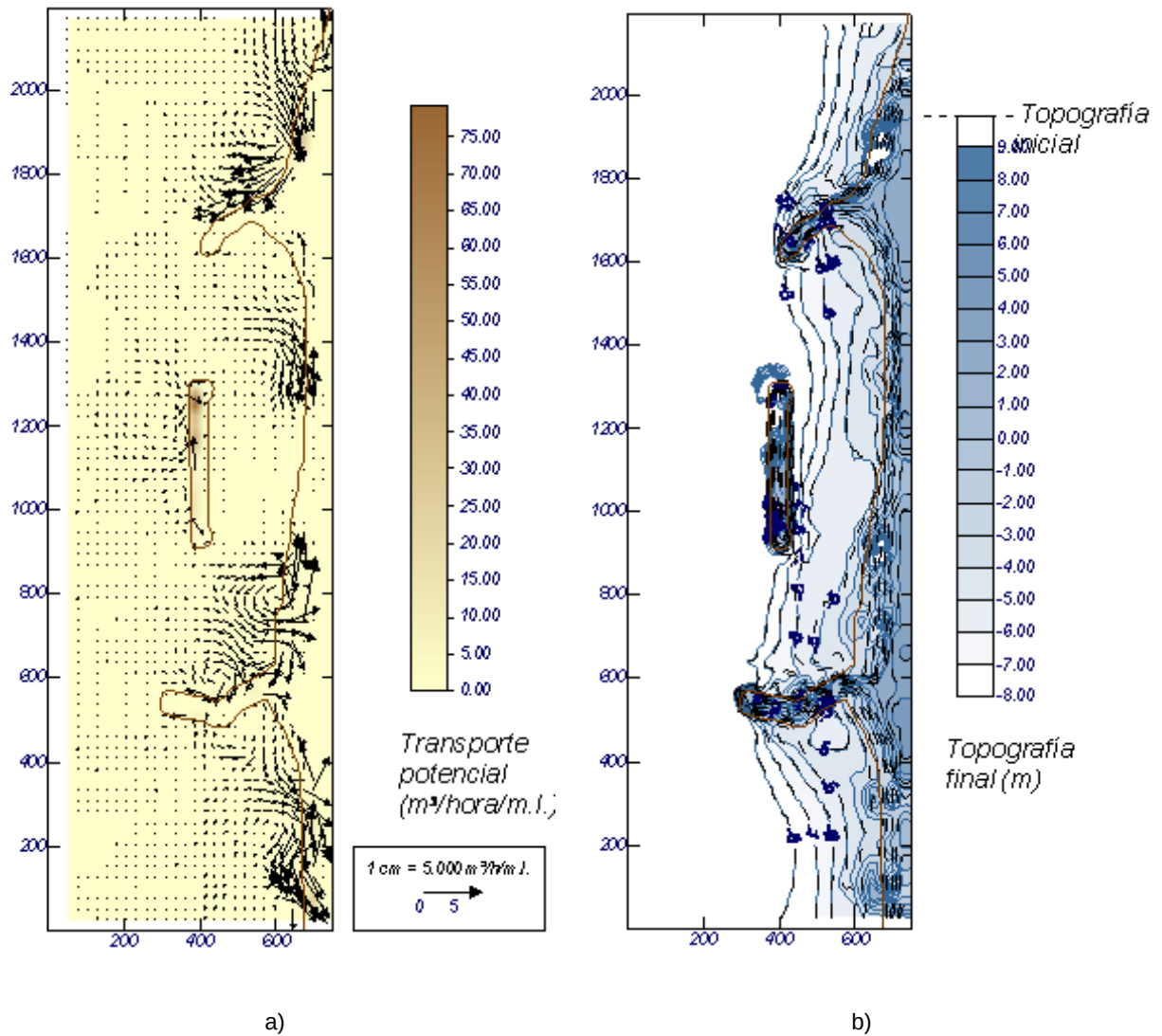


Figura B46 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: amplitude de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda significativa de 2 m, período de pico de 18 s, espectro direccional N65°W (+/- 25°)

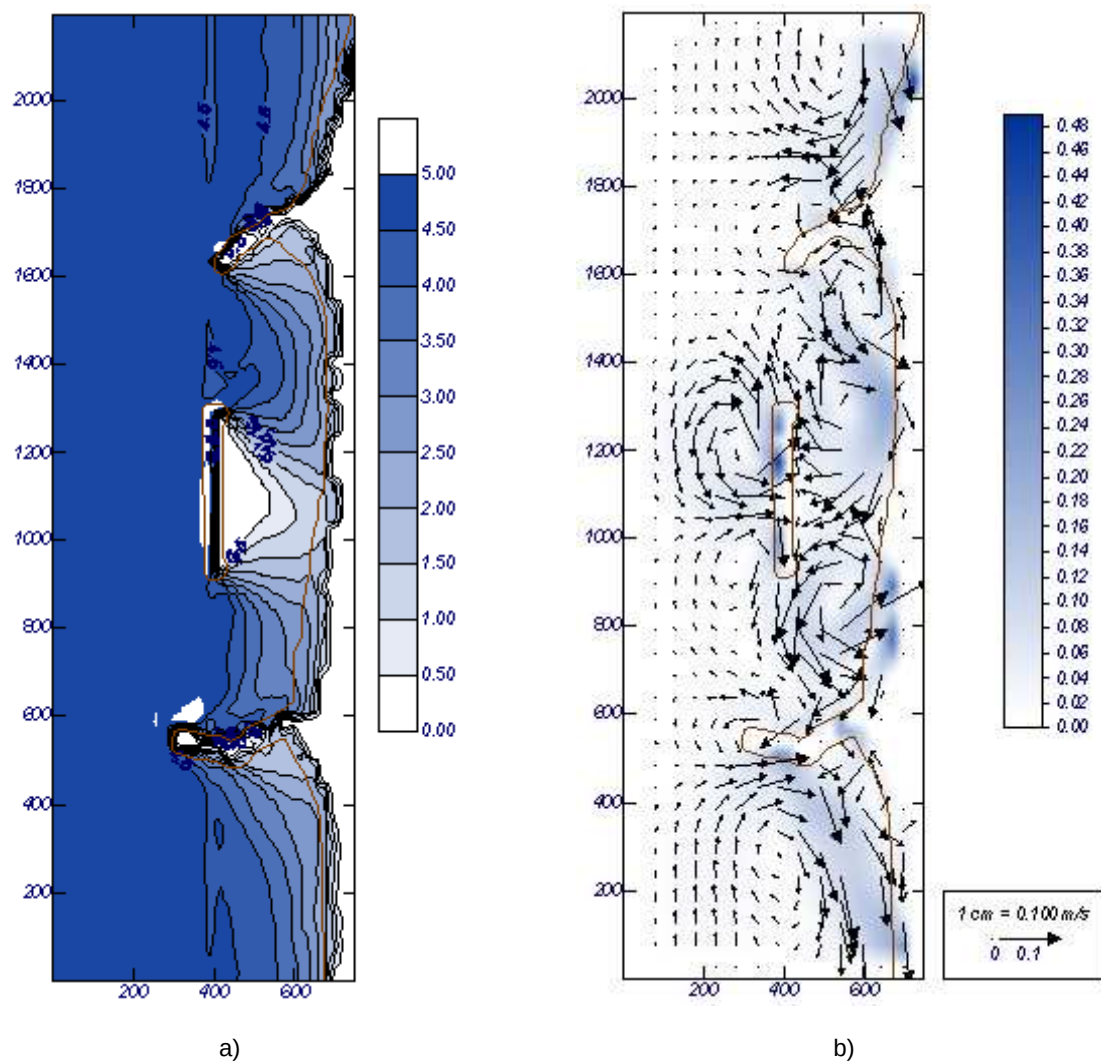


Figura B47 - a) Alturas de onda significativa, b) Vectores corrente-magnitude, simulação: amplitude de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda significativa de 5 m, período de pico de 18 s, espectro direccional N65°W (+/-25°)

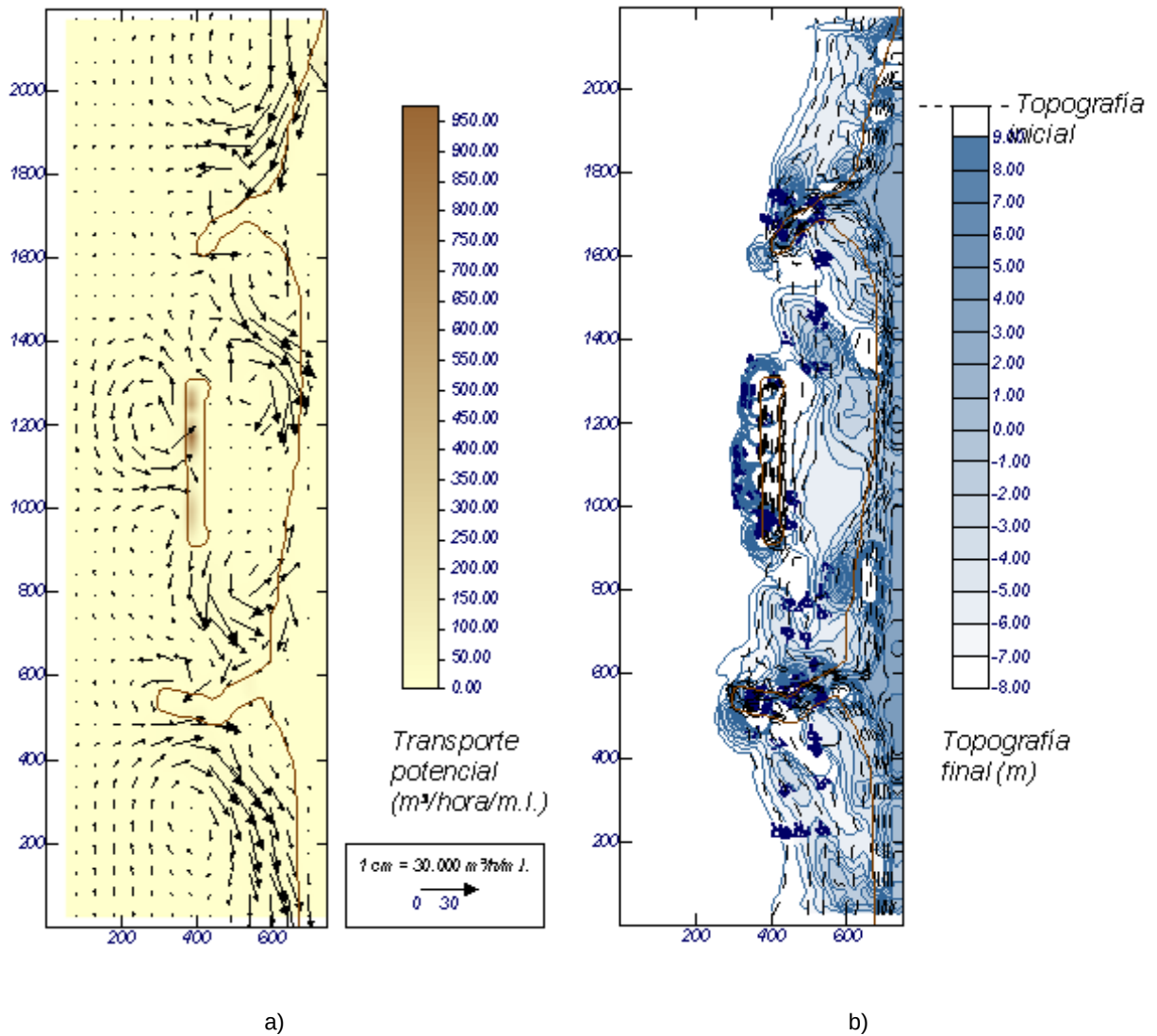


Figura B48 - a) Vectores transporte potencial-magnitude, b) Variação da batimetria, simulação: amplitude de maré +4,0 (ZH) m, altura de onda significativa de 5 m, período de pico de 18 s, espectro direccional N65°W (+/- 25°)

ANEXO C - PERFIS TRANSVERSAIS DA PRAIA

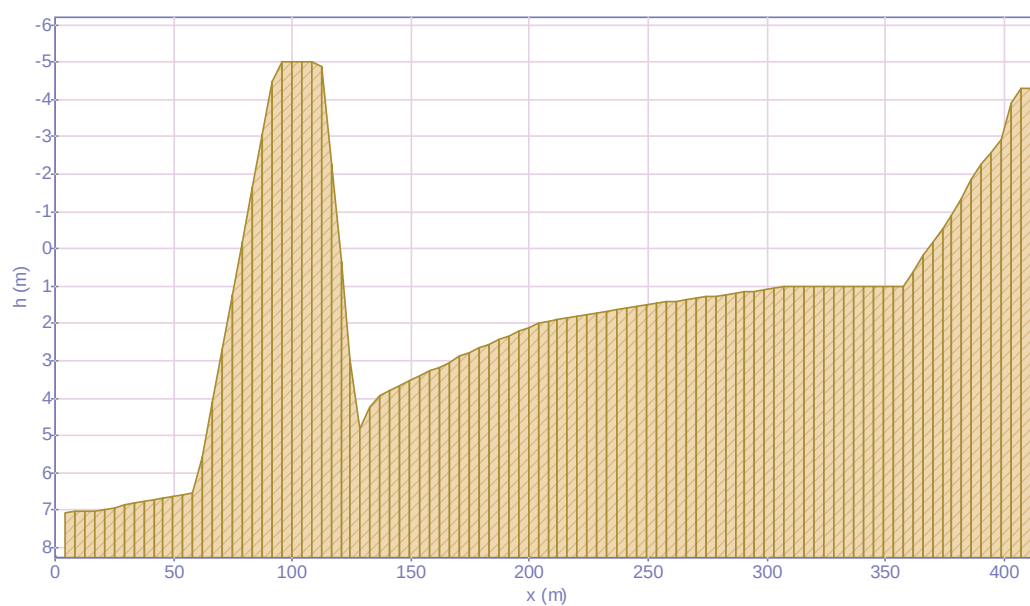


Figura C1 - Perfil transversal da linha de costa e do quebramar destacado para a situação sem tómbolo

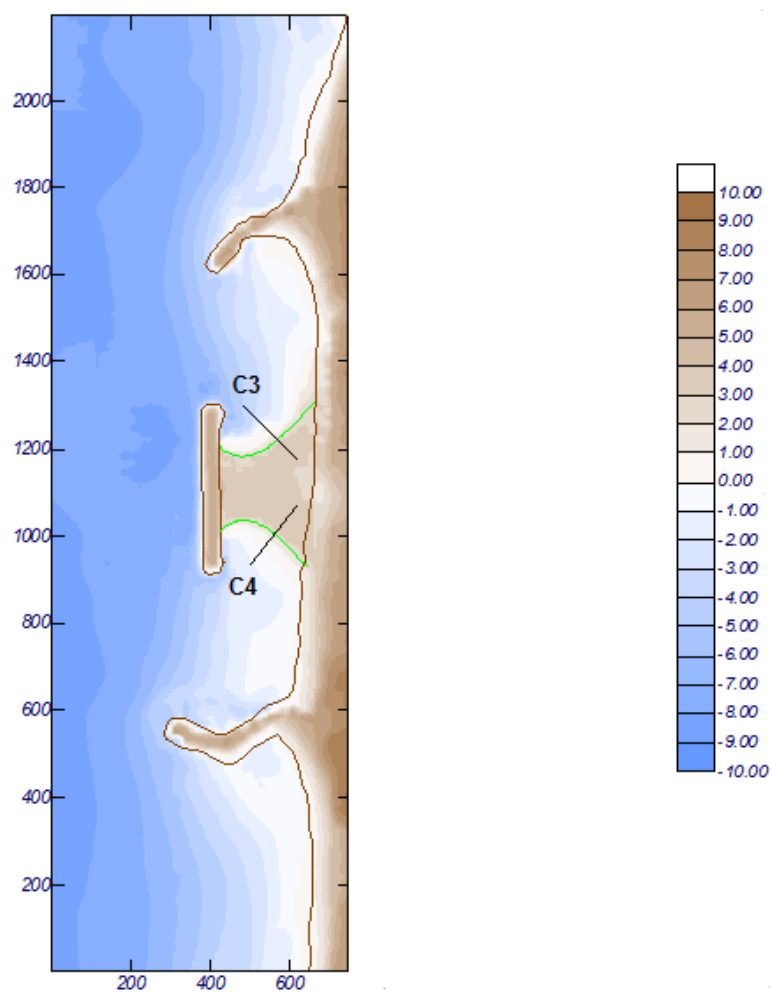


Figura C2 – Esquema dos perfis transversais das novas linhas de costa formadas pelo tómbolo

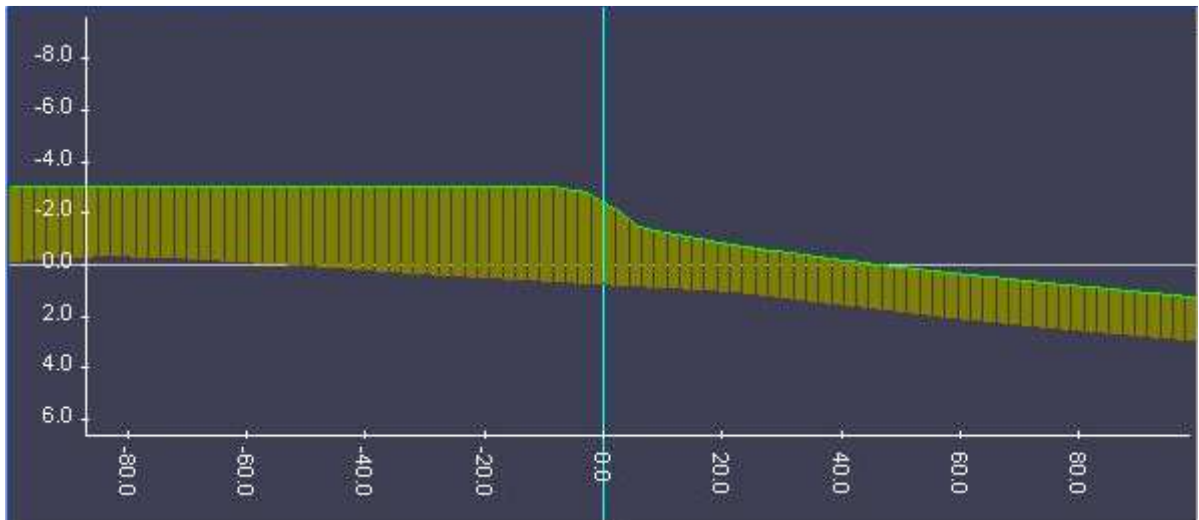


Figura C3 - Perfil transversal da nova linha de costa situada a norte, para o ponto P_0 (linha a verde representa o novo perfil do terreno, linha vermelha o perfil sem o tómbolo e a zona amarelada o volume adicional de areia para a formação do tómbolo)



Figura C4 - Perfil transversal da nova linha de costa situada a sul, para o ponto P_0 (linha a verde representa o novo perfil do terreno, linha vermelha o perfil sem o tómbolo e a zona amarelada o volume adicional de areia para a formação do tómbolo)