

Modelagem numérica do transporte de areia na praia do Cassino – RS, Brasil

Felipe C. Sprovieri¹, José A. S. Fontoura², Lauro J. Calliari³ & Rodrigo do C. Barletta⁴

¹*Mestrando do Curso de Engenharia Oceânica, Laboratório de Engenharia Costeira – FURG, Rio Grande, RS – felipe_sprovieri@hotmail.com*

²*Escola de Engenharia, Laboratório de Engenharia Costeira – FURG, Rio Grande, RS – josefontoura@furg.br*

³*Instituto de Oceanografia, Laboratório de Oceanografia Geológica – FURG, Rio Grande, RS – tsclauro@furg.br*
Coastal Planning & Engineering do Brasil – CPE, Florianópolis, SC – rbarletta@coastalplanning.net

RESUMO:

Com os recentes avanços no estudo da dinâmica sedimentar em regiões costeiras, torna-se possível investigar os mecanismos que governam o processo de transporte sedimentar, bem como, as taxas que regem este transporte. Contudo, uma análise quantitativa deste tipo de estudo envolve incertezas consideráveis, isto porque, os fenômenos envolvidos no transporte de sedimentos em ambientes costeiros apresentam padrões complexos, tanto no aspecto hidrodinâmico, como na parte da dinâmica de sedimentos. Desta forma, a utilização de modelos numéricos que descrevam/simulem a evolução morfológica do ambiente costeiro, com base no estudo do transporte de sedimentos do local, é uma alternativa que apresenta grande potencial para avaliar a dinâmica sedimentar em ambientes complexos. Este estudo visa avaliar a dinâmica do transporte de areia na praia do Cassino no Rio Grande do Sul. Para isso, será utilizado o Sistema de Modelagem Costeira (SMC), que é uma ferramenta numérica desenvolvida pelo Grupo de Engenharia Oceanográfica de Costas (GIOC), da Universidad de Cantabria, Espanha. Os resultados esperados para este estudo são avaliar a dinâmica de areia na praia do Cassino e identificar possíveis focos de erosão e/ou sedimentação ao longo da área estudada.

PALAVRAS-CHAVE: transporte de sedimentos, Sistema de Modelagem Costeira, erosão/sedimentação.

ABSTRACT:

With recent advances in the study of sediment dynamics in coastal regions, it becomes possible to investigate the mechanisms that govern the process of sediment transport, and rates governing such transport. However, a quantitative analysis of this type of study involves considerable uncertainties, because the phenomena involved in sediment transport in coastal environments exhibit complex patterns, both in terms of hydrodynamics, as in some of the dynamics of sediment. Thus, the use of numerical models that describe / simulate the morphological evolution of the coastal environment, based on the study of sediment transport from the site, is an alternative that shows great potential to assess the sediment dynamics in complex environments. This study aims to assess the dynamics of sand transport on Cassino Beach in Rio Grande do Sul. This will use the Coastal Modeling System (SMC), which is a numerical tool developed by the Engineering Group of Oceanic Coasts (GIOC), Universidad de Cantabria, Spain. The expected results for this study are to assess the dynamics of

sediments in the Casino Beach and identify possible sources of erosion and / or sedimentation along the studied area.

KEYWORDS: sediment transport, Coastal Modeling System, erosion/sedimentation.

1. INTRODUÇÃO

A morfodinâmica de ambientes costeiros é um estudo complexo. Isto devido ao alto grau de variabilidade do sistema, o qual acopla níveis energéticos que atuam em escalas espaciais e temporais distintas. O sistema costeiro é controlado através do contínuo ajuste hidrodinâmico e morfológico, sendo este fornecido pelo processo de transporte de sedimento. Este tipo de ajuste é retroalimentado, pois no momento em que a morfologia evolui, as condições encontradas pela hidrodinâmica estão alteradas, fazendo com que ocorra um re-ajuste do sistema [1]. Todos os processos de ajuste realizados dentro do sistema costeiro são reflexos do transporte de sedimento, o qual é resultado da interação entre o movimento do fluido sobre uma superfície não consolidada, induzida pela tensão de cisalhamento, gerando movimento e subsequente transporte. As implicações que o processo de transporte de sedimentos apresenta, abrangem os mais variados níveis, sendo reflexo da complexidade ambiental de cada local. No entanto, quantitativamente este tipo de estudo apresenta incertezas consideráveis, apesar do esforço dedicado a esta problemática, com erros superiores a uma ordem de magnitude [19]. Este tipo de variação encontrado nos resultados pode ser explicado pela complexidade dos fenômenos envolvidos, tanto na parte da hidrodinâmica como também na parte da dinâmica de sedimentos, as quais apresentam padrões complexos [19] [3]. Os mecanismos que governam o processo de transporte sedimentar, bem como, as taxas que regem este transporte, afetam diretamente a qualidade, durabilidade, segurança e custos (gerenciamento) envolvidos em obras costeiras, as quais visam controlar este fenômeno [3]. Quantitativamente, as taxas de transporte sedimentar que ocorrem na zona de surfe, são muito superiores que em outras zonas. Isto, devido ao processo de quebra das ondas, que ocorre neste local. O processo de quebra dissipa grande quantidade de energia contida nas ondas, mobilizando uma grande massa de sedimentos e os colocando em suspensão. Junto a este processo, a incidência oblíqua das ondas sobre a linha de costa, gera uma corrente, conhecida como corrente longitudinal, a qual tem alta capacidade de transportar sedimentos na zona de surfe. Porém, a zona de surfe apresenta caráter hostil para o levantamento de dados de campo, desta forma, a complexidade de estudos morfológicos que abordem uma escala temporal em nível de engenharia torna-se comprometida. Portanto, a utilização de modelos que descrevam/simulem a evolução morfológica do ambiente costeiro é uma alternativa que apresenta grande potencial. Desde que, os dados ambientais inseridos no modelo sejam de qualidade e que os processos/resultados obtidos pela modelagem possam ser confrontados/comparados com dados medidos *in situ*.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é investigar o transporte de areia na Praia do Cassino no Rio Grande do Sul, através de modelagem numérica. As simulações realizadas para tal objetivo são baseadas em cenários, os quais representam estados de mar predominantes na região. O primeiro cenário utilizado na modelagem representa período de primavera e verão e, o segundo cenário representa período de outono e inverno. Ainda é utilizado um terceiro cenário, que representa condições extremas observadas na costa do Rio Grande do Sul.

3. ÁREA DE ESTUDO

A Praia do Cassino (Figura 1) está localizada na porção centro-sul da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Esta planície possui 700 km de comprimento e até 120 km de largura no sistema lagunar formado pela Lagoa dos Patos e Lagoa Mirim [3]. A praia do Cassino, pertence ao município de Rio Grande e, está localizada ao sul da desembocadura da Lagoa dos Patos (Figura 1).

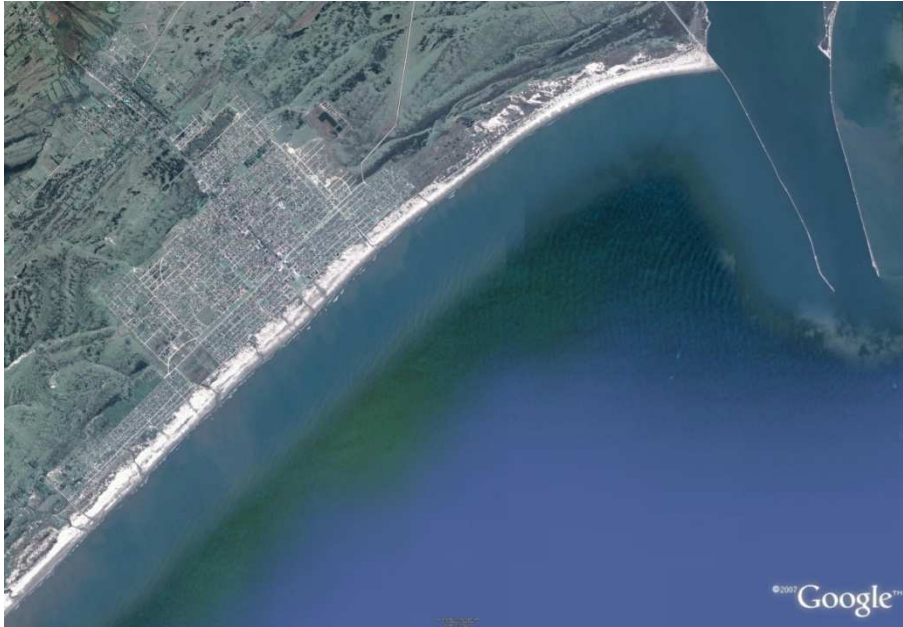


Figura 1. Área de estudo mostrando a Praia do Cassino e os molhes da barra de Rio Grande.

A linha de costa do estado do Rio Grande do Sul se estende por 630 km, apresentando características homogêneas ao longo de sua extensão. A ausência de promontórios rochosos e/ou baías no decorrer de sua trajetória a torna uma linha de costa singular, sendo uma costa arenosa totalmente exposta à energia incidente do ambiente oceânico adjacente.

A praia do Cassino está altamente influenciada pela desembocadura da Lagoa dos Patos, onde a presença dos molhes da Barra de Rio Grande exerce papel fundamental no comportamento das características morfodinâmicas da praia. A linha de costa da Praia do Cassino possui orientação segundo o eixo nordeste-sudoeste (NE-SW), enquanto o eixo central da desembocadura da Lagoa dos Patos, nos molhes da Barra de Rio Grande, segue orientação noroeste-sudeste (NW-SE), formando um ângulo de aproximadamente 73° com o prolongamento da linha de praia ao sul [3].

4. MODELAGEM

A modelagem numérica dos processos envolvidos no transporte de areia na Praia do Cassino será realizada através do Sistema de Modelagem Costeira – SMC. O SMC é uma ferramenta numérica desenvolvida pelo Grupo de Engenharia Oceanográfica e de Costas (GIOC), da Universidade de Cantabria, Espanha, no âmbito da Direção Geral de Costas do Ministério do Meio Ambiente [4]. O uso do SMC é destinado especificamente a engenheiros técnicos, os quais desenvolvem atividades no âmbito costeiro.

O SMC integra uma série de modelos numéricos, os quais se encontram estruturados de acordo com as escalas temporais e espaciais dos processos a serem modelados. Na Figura 2 é apresentada a estrutura de organização do SMC [4].

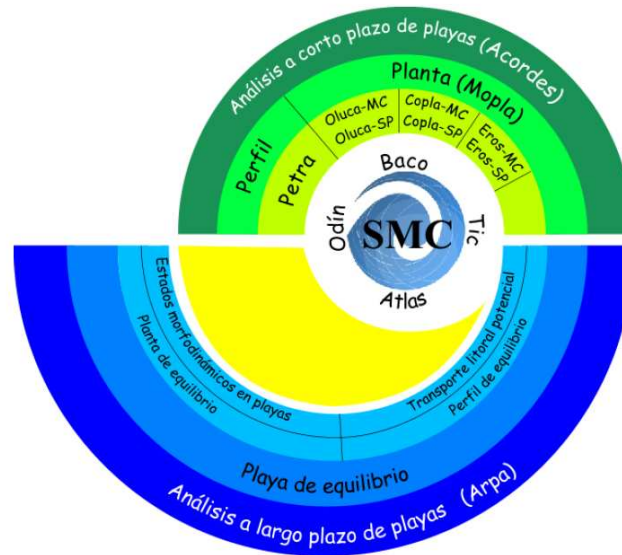


Figura 2. Estrutura de organização do Sistema de Modelagem Costeira - SMC.

O Sistema de Modelagem Costeira – SMC é estruturado em cinco módulos fundamentais. Pré-Processo é o módulo que permite caracterizar e processar informações de entrada para os diferentes modelos numéricos. O módulo de análise de curto prazo de praias Acordes recorre às ferramentas numéricas que permitem analisar a morfodinâmica de um sistema costeiro, em uma escala espaço-temporal de curto prazo. O Arpa é o módulo que permite analisar a morfodinâmica de praias em uma escala espaço-temporal de médio e longo prazo. O módulo de Modelagem de Terreno permite modificar os contornos do fundo (batimetria) e laterais (estruturas), o qual é fundamental para avaliar diferentes cenários de um projeto de engenharia. Finalmente, o módulo Tic é o tutor de engenharia de costas que se encontra dentro do SMC como apoio teórico, conceitual e de informação básica para os diferentes modelos numéricos do sistema [4].

No escopo do presente trabalho, foi utilizado para modelagem dos processos costeiros o módulo MOPLA, que está dentro do Acordes, sendo um módulo que analisa a morfodinâmica de praia em uma escala espaço-temporal de curto prazo.

4.1 Mopla

O MOPLA é composto por três modelos numéricos distintos que simulam a evolução morfodinâmica de uma praia, modelando a propagação e transformação das ondas sobre o domínio (OLUCA), determinado o sistema de correntes (COPLA) através dos tensores de radiação devido à propagação das ondas, e calculando o transporte de sedimento e evolução batimétrica (EROS), com base no campo de ondas e correntes [7].

Os modelos OLUCA, COPLA e EROS trabalham sequencialmente, pois os dados de saída de um modelo são utilizados como entrada para o próximo. Inicialmente, calculam-se os campos de ondas para os casos executados no modelo OLUCA. Os resultados obtidos são executados no COPLA para o cálculo do campo de correntes em função dos tensores de radiação gerados

pelos componentes de energia das ondas. E por fim, os dados de velocidade e direção do campo de correntes são utilizados para determinação do transporte de sedimentos [7].

4.1.1 Oluca

O OLUCA é um modelo combinado de refração-difração que resolve a aproximação parabólica fracamente não linear da equação da pente suave, simulando o comportamento de ondas monocromáticas (OLUCA-MC) ou espectrais (OLUCA-SP), em batimetrias irregulares [9]. No presente trabalho, utilizaram-se os modelos de propagação de ondas espectrais.

O modelo de propagação de ondas OLUCA combina o modelo inicial apresentado por Kirby e Dalrymple [10], denominado inicialmente REF/DIF, com a modificação proposta por Kirby e Özkan [13], que foi denominada REF/DIF S [5]. Estes modelos se baseiam na expansão em série de Stokes das equações que definem o problema da propagação de ondas, incluindo uma aproximação até terceira ordem da velocidade de fase de onda ou celeridade [5]. A amplitude da onda se aproxima até segunda ordem [14]

Este modelo resolve a aproximação parabólica da equação de pente suave, incluindo os processos de empolamento (shoaling), refração, difração e dissipação de energia por quebra para um espectro de energia discretizado em frequências e direções [5]. A dissipação de energia por quebra foi modelada segundo Thornton e Guza [20]. O modelo fornece como resultado o campo de ondas (altura de onda significativa e direção do fluxo médio de energia) em todo domínio de cálculo.

O modelo OLUCA-SP é um modelo espectral não dispersivo que resolve a fase com base nas equações do balanço da quantidade de movimento e fluxo de massa. O modelo requer como entrada um contorno externo (*offshore*), um estado de mar direcional em qual esta representado por um espectro bidimensional discretizado em componentes frequências e direcionais, as quais são propagadas de maneiras simultâneas [5].

Assumindo que a superfície livre da água é periódica no tempo e que a dependência espacial pode-se dividir em uma fase que varia rapidamente e em uma amplitude que varia lentamente, a elevação da superfície livre da água, η , pode ser representada como uma soma de componentes frequências e direcionais, assim:

$$\text{Equação 01. } \eta = \sum_j \sum_l \eta_{jl} = \text{Re} \left\{ \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_d} A_{jl}(x, y) e^{i\psi_j} \right\}$$

$$\text{Equação 02. } \psi_j = i\bar{K}_{jk} - \sigma_j$$

$$\text{Equação 03. } \bar{K}_j = 1/B \int_0^B K_j(x, y) dy$$

Onde:

x, y = Sistema de coordenadas, tal que o eixo x va na direção principal de propagação e que o eixo y seja perpendicular.

j, l = Índice que representa a frequência e direção respectivamente.

Re = Parte real de um número complexo z .

$A_{jl}(x, y)$ = Amplitude de onda completa para uma componente frequencial j e direcional l . definida em um ponto (x, y) do domínio.

N_f, N_o = Número de discretizações em frequência e direção, respectivamente.

$K_j(x, y)$ = Número de onda para uma componente com frequência angular j .

$\frac{\sigma_j}{k_j(x)}$ = Valor representativo do número de onda associado a uma frequência angular j , em uma cordenada x .

B = Largura do domínio (no eixo y).

Quando o campo de onda consiste em ondas planas, $A_{jl}(x, y)$ pode ser representada em termos de uma amplitude constante a_{jl} e uma direção θ_{jl} como:

$$\text{Equação 04. } A_{jl}(x, y) = a_{jl} e^{i[(k_j \cos \theta_{jl} - k_x)x + k_y \sin \theta_{jl}y]}$$

Assume-se que a refração, difração e empolamento de componete de onda discretas, está governada pela aproximação parabólica onda-corrente das equações de pendente suave [11]. A equação que governa a amplitude complexa no OLUCA-SP é dada por Kirby [12].

4.1.2 Copla

O modelo COPLA é um modelo bidimensional de corrente em praias que resolve as equações da continuidade e quantidade de movimento, deobtidas a partir da equação de Navier-Stokes. As equações são integradas na profundidade e respondem a um período de tempo e em um sistema de coordenadas, localizado no nível médio do mar (x = direção transversal à praia; y = direção longitudinal à praia; z = direção vertical) [6].

Os campos de correntes gerados e variações do nível médio são determinados a apartir do cálculo dos gradientes dos tensores de radiação. Os resultados obtidos pelo modelo são o campo vetorial de velocidades e o campo de níveis sobre o domínio [6].

Os tensores de radiação são calculados com base nos tensores que cada componente de energia da onda gera. Estas componentes se propagam formando um ângulo θ com o eixo x e a soma linear de todas estas em um ponto do domínio, determinam as seguintes expressões dos tensores de radiação:

$$\text{Equação 05. } S_{xx}(x, y) = \frac{1}{2} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_o} |A_{jl}|^2 \left[n_j (1 + \cos^2 \theta_{jl}) - \frac{1}{2} \right]$$

$$\text{Equação 06. } S_{yy}(x, y) = \frac{1}{2} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_o} |A_{jl}|^2 \left[n_j (1 + \text{sen}^2 \theta_{jl}) - \frac{1}{2} \right]$$

$$\text{Equação 07. } S_{xy}(x, y) = \frac{1}{4} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_o} |A_{jl}|^2 n_j \text{sen}(2\theta_{jl})$$

$$\text{Equação 08. } n_j = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sigma_j k_j h}{\text{sen} \theta_{jl} (\sigma_j k_j h)} \right)$$

Onde:

$A_{jl}(x, y)$ = amplitude para uma componente frequencial j e direcional l .

h = profundidade do nível de referência.

H = profundidade total.

j = componente frequencial em uma onda irregular.

l = componente direcional em uma onda irregular.

n_j = relação de velocidades do grupo c_g com respeito a velocidade de fase c .

S_{xx} = tensor de radiação atuando no plano x ao longo do eixo x .

S_{xy} = tensor de radiação atuando sobre o plano y ao longo do eixo x (por simetria $S_{xy} = S_{yx}$).

S_{yy} = tensor de radiação atuando no plano y ao longo do eixo y .

K_j = número de onda associado à componente frequencial j .

θ_{jl} = ângulo do vetor número de onda com o eixo x para uma componente frequencial j e direcional l .

g = aceleração da gravidade.

4.1.3 Eros

O modelo EROS calcula o transporte de sedimentos em suspensão e no fundo, com base nos campos de ondas e correntes geradas pela ondulação propagada. O modelo resolve as equações do fluxo de sedimentos dentro da zona de surfe, bem como as mudanças na batimetria associada às variações espaciais do transporte de sedimentos [8]

A equação utilizada para simular os efeitos de transporte de sedimentos neste estudo foi a de Soulsby [15]. Esta formulação é uma expressão analítica experimental que aproxima a formulação de onda-corrente de van Rijn [22]. Sendo efetiva para o transporte de fundo e de suspensão.

$$\text{Equação 09. } Q_t = A_s \bar{U} \left[\left(\bar{U}^2 + \frac{0.013}{\sigma_p} U_{rms}^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \bar{U}_{cr} \right]^{2.4}$$

Onde:

$$Q_t = (q_x, q_y)$$

$$A_s = A_{sb} + A_{ss}$$

$$\text{Equação 10. } A_{sb} = \frac{0.005h (D_{50}/h)^{1.2}}{[(s-1)gD_{50}]^{1.2}}$$

$$\text{Equação 11. } A_{ss} = \frac{0.0012 D_{50} D_s^{-0.6}}{[(s-1)gD_{50}]^{1.2}}$$

\bar{U} = velocidade na vertical (\bar{u}, \bar{v})

U_{rms} = velocidade orbital quadrática média, $U_{rms} = (u_{orb}, v_{orb})$

$$\text{Equação 12. } C_D = \left[\frac{0.40}{\ln(h/z_0 - 1)} \right]^2 = \text{coeficiente de fricção devido a corrente.}$$

\bar{U}_{cr} = velocidade crítica de início de movimento (assumindo a rugosidade efetiva $K_s = 3D_{90}$, $D_{90} = 2D_{50}$)

$$\text{Equação 13. } \bar{U}_{cr} = 0.19(D_{50})^{0.4} \log_{10} \left(\frac{4h}{D_{90}} \right) \quad 0.1 \leq D_{50} \leq 0.5 \text{ mm}$$

$$\text{Equação 14. } \bar{U}_{cr} = 8.5(D_{50})^{0.6} \log_{10} \left(\frac{4h}{D_{90}} \right) \quad 0.5 \leq D_{50} \leq 2 \text{ mm}$$

Onde:

h = profundidade

D_{50} = diâmetro médio do sedimento

D_{90} = diâmetro que é superado por 10% em peso

Z_0 = rugosidade do fundo (≈ 0.006 m)

s = densidade relativa

g = aceleração da gravidade

ν = viscosidade cinemática da água ($\nu = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

Equação 15.
$$D_s = \left[\frac{g(s-1)}{\nu^3} \right]^{1/3} D_{s0}$$

5. CENÁRIOS SIMULADOS

A modelagem do transporte de sedimentos na Praia do Cassino será realizada a partir de cenários, os quais representam estados de mares característicos do local investigado. O clima de ondas corresponde ao padrão estatístico dos seus parâmetros descritivos, tais como altura significativa (H_s), período (T), direção (Dir) de propagação e energia. As ondas geradas pelo vento aqui são designadas por vagas ou *sea*, e aquelas geradas por tempestades longe do local de geração, por ondulações ou *swell*. Em geral, no litoral do Rio Grande do Sul, os dois regimes estão presentes, tanto as vagas quanto as ondulações, o que caracteriza um espectro direcional bi-modal, interferindo um sobre o outro e com predominância ora das vagas, ora das ondulações [21].

A idéia geral na escolha do cenário a ser simulado, parte da abordagem em como as taxas de transporte de sedimentos varia no local estudado. Fontoura [3], através de dados medidos na Praia do Cassino, verifica que as taxas de transporte de sedimentos oscilam significativamente, mediante as condições ambientais governantes no momento analisado. A magnitude das taxas envolvidas no processo de transporte de sedimentos na Praia do Cassino oscila entre 0,23 e 25,1 m^3/h , segundo as condições ambientais regentes durante o período de medição [3].

Partindo desta análise, e focando a importância do estudo de modelagem de transporte de sedimentos no local seja aplicada a práticas de projetos de engenharia, segurança de navegação e gerenciamento costeiro, assume-se que simular condições de mar que ocorram constantemente ao longo do ano na Praia do Cassino, seja uma forma eficaz para estimar valores de transporte de areia no local. Desta forma, torna-se possível analisar as taxas envolvidas no processo, eliminando valores subestimados ou superestimados. Assim, o valor encontrado conduzirá a uma abordagem padrão, ou seja, será estimada a taxa de transporte de areia que ocorre em condições energéticas normais, segundo as características de mares mais freqüentes verificadas no local.

Os cenários escolhidos se basearam nos resultados obtidos por Strauch [16] [17] e Strauch *et al.*, [18]. Onde foi realizado o monitoramento do clima ondulatorio em Rio Grande, a partir de dados medidos por um ondógrafo direcional, tipo Waverider, durante o período de 28 meses (início da medição outubro de 1996). O ponto de fundeio do ondógrafo foi $32^\circ 10' \text{ S}$ e $51^\circ 58' \text{ W}$, na profundidade de 17 m.

O cenário 01, foi determinado como sendo característico de primavera e verão, com ondas de altura significativa média de 1 m, propagando-se com uma direção média de 110° (ESE), tendo como período significativo médio 8 s.

O cenário 02, foi determinado como sendo característico de outono e inverno, com ondas de altura significativa média de 1,5 m, propagando-se com uma direção média de 160° (SSE), tendo como período significativo médio 12 s.

6. VALIDAÇÃO DO MODELO

Para validar a modelagem para área de estudo em questão e, desta forma poder avaliar o transporte de areia no local, foram realizadas simulações baseadas em casos medidos no local. Fontoura [3] através do uso de trapeadores de sedimentos instalados na zona de surfe da praia do Cassino mediu a taxa de transporte em três perfis transversais a linha de costa. Concomitantemente à medição da taxa de transporte de areia realizada, foram adquiridos dados de altura de onda com o uso de vídeo e, dados de corrente longitudinal através de bóia derivadora e bússola. Os dados medidos neste trabalho, bem como as condições governantes no momento da medição foram simulados no SMC, para que os valores encontrados na modelagem fossem comparados aos medidos, e a partir da comparação fosse estabelecido um critério de avaliação do modelo para o local investigado. Os dados medidos por Fontoura [3] utilizados para validação do modelo para área de estudo podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1. Tabela com os dados medidos em Fontoura 2004.

Pontos	Hb (m)	Tb (s)	Dir (°)	CL (m/s)	Dir (°)*	Q (m ³ /h)
Perfil_01	0,57	14	117	0,14	NE-SW	1,92
Perfil_02	0,78	9,4	137	0,1	SW-NE	25,1
Perfil_03	0,72	8,5	167	0,28	SW-NE	4,24

Onde:

Hb (m): Altura de onda na arrebentação.

Tb (s): Período de onda na arrebentação.

Dir (°): Direção de onda.

CL (m/s): Velocidade da corrente longitudinal.

Dir (°)*: Direção da corrente longitudinal.

Q (m³/h): Taxa de transporte de areia.

Ressalta-se que já se espera uma discrepância nos resultados, pois os dados medidos *in situ* acoplam fenômenos naturais que não são introduzidos na modelagem. A principal diferença esperada é em relação ao vento, pois este agente energético possui grande influência no transporte de sedimentos no local [3] [23] [16]. O SMC não possui acoplamento entre vento e ondas, diferentemente de modelos como Delft 3D, que utiliza o SWAN como propagador de ondas, o qual possibilita acoplar o vento sobre a superfície, como agente energético externo [2]. Existem outros fenômenos que contribuem para diferir os dados medidos dos modelados, isso devido à modelagem numérica estar limitada em formulas empíricas e semi-empíricas, as quais nem sempre se ajustam perfeitamente a área de estudo em questão.

Os resultados de transporte de areia encontrados na simulação dos dados medidos na Praia do Cassino são apresentados na Tabela 2. Os resultados são referentes a cada perfil modelado, no mesmo local aonde foram medidos os dados por Fontoura [3].

Tabela 2. Tabela com os dados de transporte de areia modelados pelo SMC para validação do estudo.

Pontos	Q (m ³ /h)	Dir (°)
Perfil_01	5,94275	227,942
Perfil_02	0,79955	67,592
Perfil_03	0,79821	144,708

Onde:

Dir (°)*: Direção da corrente longitudinal.

Q (m³/h): Taxa de transporte de areia.

A partir dos resultados da validação foi possível observar que existe diferença entre os dados medidos e os dados modelados. Esta diferença encontrada pode ser explicada pela influência de forçantes locais que atuam na área estudo, como por exemplo, o vento. Este agente energético influencia fortemente o transporte de sedimentos na costa do Rio Grande do Sul, fazendo com que os dados modelados apresentassem discrepância com os dados medidos por Fontoura [3]. O vento influencia fortemente a corrente superficial na zona de surfe da Praia do Cassino, desta forma controlando significativamente o transporte de areia no local [10]. Outro fator que deve ser considerado, é que os dados de transporte de areia medidos por Fontoura [3] abrangem varias classes granulométricas presentes no local de cada medição, já os dados modelados utilizam apenas um diâmetro médio de grão. Neste trabalho foi utilizado apenas areia fina como tipo de sedimento de fundo do modelo, com diâmetro médio de grão de 0,125 mm.

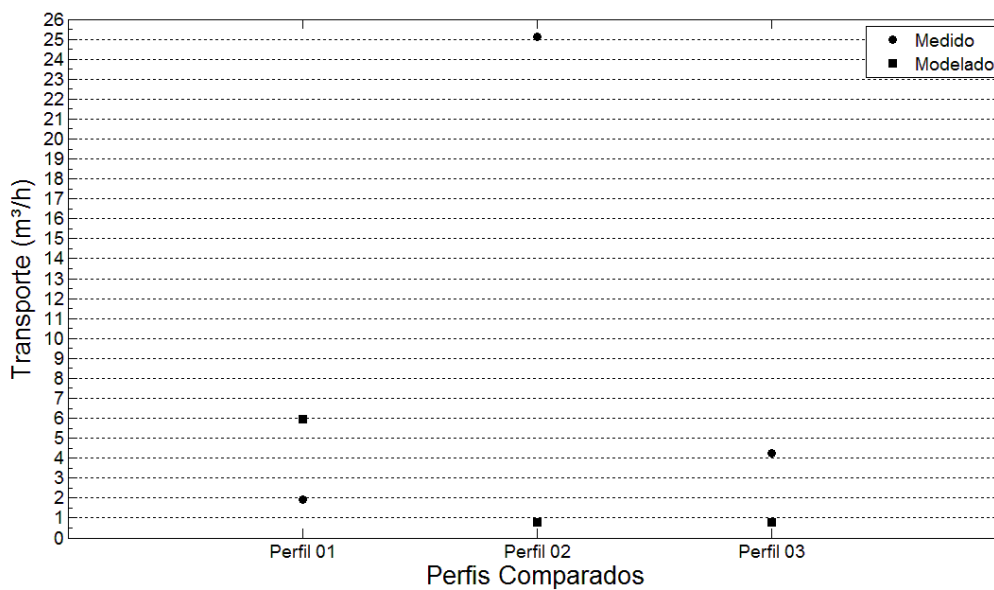


Figura 3. Comparação entre os dados medidos em três perfis localizados na Praia do Cassino e, os dados modelados com o SMC.

Analisando os resultados da taxa de transporte na validação do modelo, é possível observar que no Perfil 01 o valor encontrado na modelagem foi superior ao medido. Nos Perfis 02 e 03 os dados modelados foram inferiores aos medidos. Como cada perfil foi simulado com características hidrodinâmicas específicas, não é possível comparar um perfil com outro, com intuito de determinar uma taxa de variação entre os dados medidos e modelados. Ressalta-se, que por mais que os valores encontrados apresentem-se distintos dos medidos, o modelo responde de forma eficaz para o local estudado. Visto que existem diversos fenômenos que ocorrem na natureza que não estão acoplados na modelagem, devido às limitações do modelo. Principalmente em relação aos tipos de sedimentos presentes no local, pois Fontoura [3] determinou a taxa de transporte ao longo de toda coluna d'água, desta forma medindo tanto o sedimento transportado no fundo, como o sedimento em suspensão na coluna d'água. A modelagem foi realizada utilizando o sedimento de fundo apenas, sendo assim subestimando os resultados.

7. RESULTADOS

Os resultados obtidos na modelagem serão apresentados de acordo com os casos simulados. Foram simulados dois casos de ondas observados no local ao longo do ano [17] [18], um referente ao clima de ondas de verão e primavera e, o outro clima de ondas para o inverno e outono.

Caso 01: Primavera e Verão

Na Figura 4 é possível observar a distribuição dos campos de altura significativa de onda (H_s) ao longo da área de estudo, representando a incidência de ondas na primavera e verão. Neste caso foi observada a concentração de energia de onda próxima ao cabeço do molhe oeste, com altura significativa de 1,50 m. Esta concentração dissipa-se em direção a linha de costa, mantendo parte da energia. Ao chegar à linha de costa, a ondulação atingiu 1,20 m de altura significativa, esse evento ocorre na região do terminal da Praia do Cassino. Foi também observado a presença dos molhes agindo sobre a hidrodinâmica local. A presença dos molhes atenuou a energia de onda para o caso simulado, formando uma zona de sombra adjacente ao molhe oeste. Na zona de sombra a altura significativa de onda manteve-se em torno de 0,40 m, ou até mesmo em determinados locais a energia foi completamente dissipada. No lado leste dos molhes, principalmente no cabeço do molhe leste, a modelagem revelou uma intensa focalização de energia. Também se verificou outros pontos de focalização na Praia do Mar Grosso.

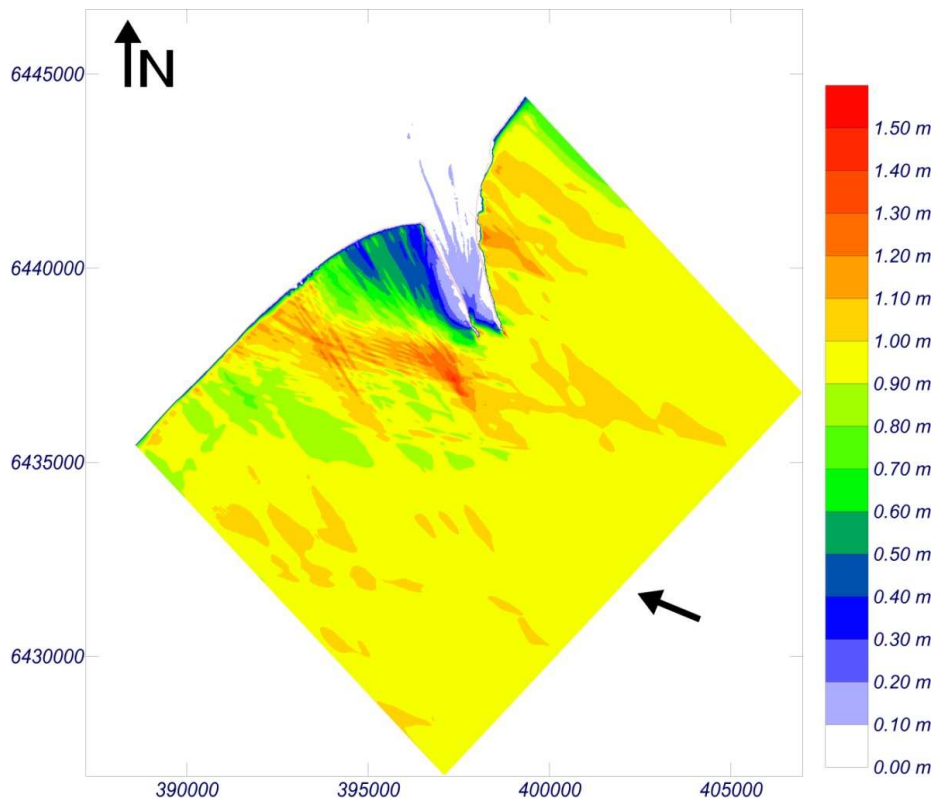


Figura 4. Distribuição dos campos de altura de onda ao longo da área de estudo.

Como as ondas incidiram com ângulo de 110° neste cenário, observou-se a entrada de ondas no canal de navegação do Porto de Rio Grande, principalmente adjacente ao molhe oeste. As ondas dentro do canal mantiveram-se em torno de 0,60 m na entrada do canal, diminuindo intensidade canal adentro, até a completa dissipação energética. Uma questão fundamental na

análise hidrodinâmica do canal de navegação do Porto de Rio Grande é que o SMC não assume o fluxo de descarga do canal, desta forma a barreira hidráulica adjacente aos molhes não existe na modelagem. Tornando os resultados apresentados na Figura 4 uma análise simplista, apenas considerando a ondulação como agente hidrodinâmico local.

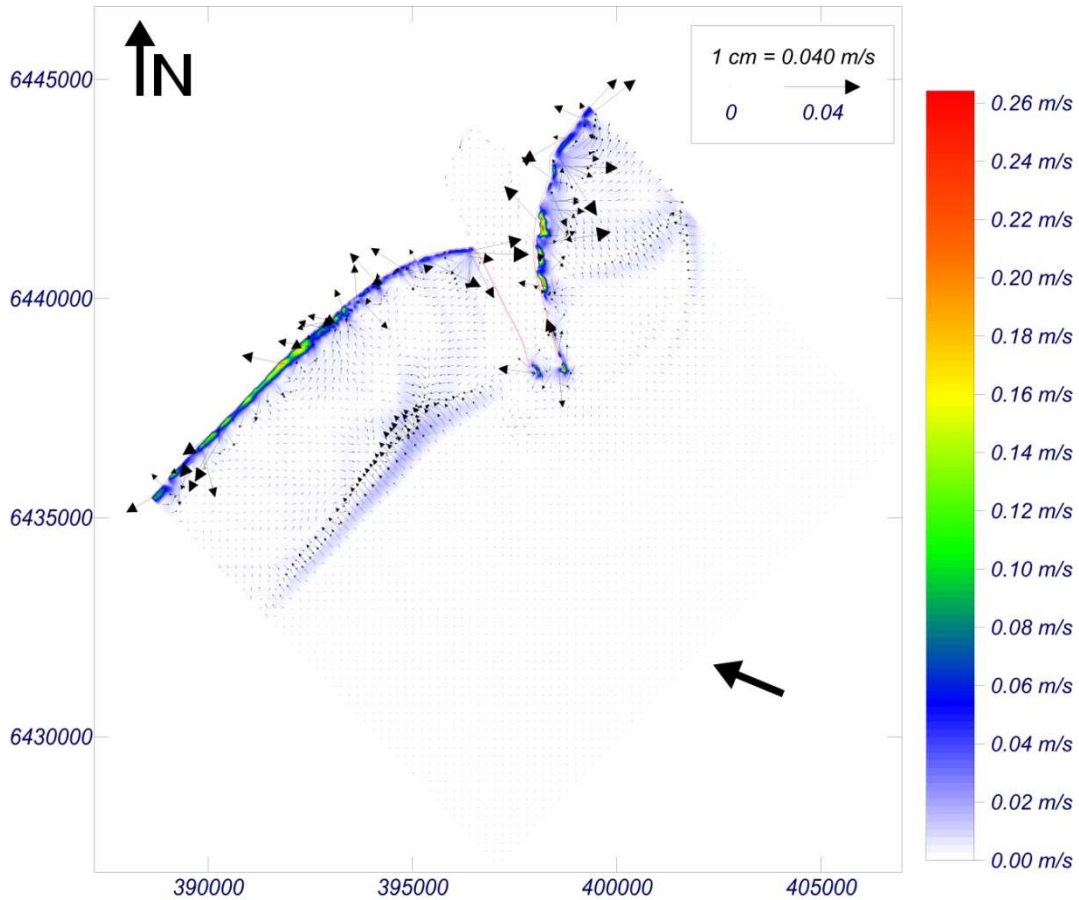


Figura 5. Distribuição dos campos de correntes ao longo da área de estudo.

A distribuição dos campos de corrente ao longo da área de estudo é apresentada na Figura 5. Observa-se um intenso fluxo longitudinal na região próxima ao terminal da Praia do Cassino. Como as correntes são calculadas de acordo com os tensores de radiação das ondas, é de se esperar onde existe uma concentração de energia de onda neste local (Figura 4). Analisando as correntes na Praia do Cassino são observados dois focos isolados com aproximadamente 0,14 m/s entre o terminal da Praia do Cassino e os molhes do canal de acesso ao Porto de Rio Grande. Na área do terminal respectivamente existe uma concentração de correntes com aproximadamente 0,20 m/s, que se direcionam para sudoeste com 0,10 m/s até perder totalmente a intensidade. Foi observada uma componente energética adjacente a base do molhe oeste na Praia do Cassino, esta componente provavelmente esta associada ao fluxo lateral que existe em estruturas costeiras em praias. Este fluxo lateral seria o retorno da energia incidente na praia, funcionando como uma corrente de retorno paralela ao molhe (a estrutura presente que fornece a direção do fluxo).

A modelagem do transporte de areia na Praia do Cassino é apresentada na Figura 6. A linha de costa da Praia do Cassino apresenta dois padrões de transporte de areia ao longo de sua extensão. Um padrão de transporte é observado entre a região do terminal até a base do molhe oeste na Praia do Cassino, nesta área existe uma deriva litorânea no sentido sudoeste para nordeste com taxa de transporte máxima em torno de 0,10 m³/h/m. O segundo padrão

verificado abrange a região do terminal em direção ao sul da Praia do Cassino, onde o sentido da deriva litorânea apresenta orientação de nordeste para sudoeste. As taxas de transporte de areia envolvidas nesta área chegam a atingir $0,50 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, isto verificado entre o terminal e a estátua de Iemanjá na Praia do Cassino. Como as correntes longitudinais mais intensas observadas no caso 01, localizaram-se na região do terminal na Praia do Cassino, com sentido de nordeste para sudoeste, implicando no transporte de areia ser intenso nesta mesma direção.

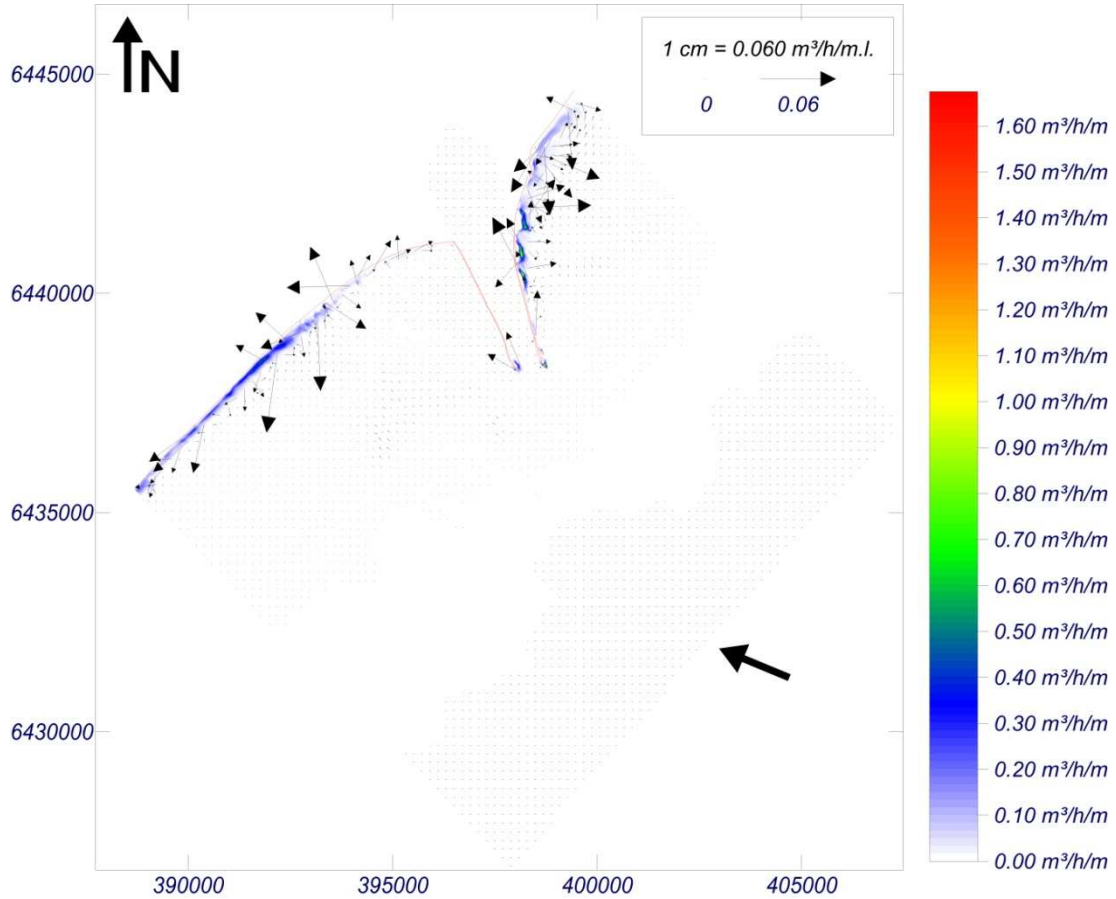


Figura 6. Distribuição do transporte de areia ao longo da área de estudo.

Caso 02: Outono e Inverno

Analisando a distribuição de altura de onda no caso 02, apresentado na Figura 7, observou-se um maior nível energético incidente comparado ao caso 01, mostrado na Figura 4. Os locais onde existe a concentração energética praticamente são os mesmos, porém a intensidade envolvidas no processo apresentaram-se distintas. No caso 02 (Figura 7) a altura de onda próxima ao cabeço do molhe oeste na praia do Cassino está em torno de 2,20 m. Contudo, a energia acumulou-se mais próximo do molhe em relação ao caso 01 (Figura 4). Na região central da Praia do Cassino, entre o terminal e a estátua de Iemanjá, existe outra focalização de energia incidente de onda, está entra em uma maior área na linha de costa, comparado à concentração próxima ao molhe. Nesta simulação as ondas entraram para dentro do canal de navegação do Porto de Rio Grande com maior intensidade, isto devido ao ângulo de incidência das ondas estar orientado próximo ao ângulo dos molhes, desta forma favorecendo a propagação da energia para dentro do canal. Foram observado ondas com altura significativa de aproximadamente 0,50 m dentro do canal.

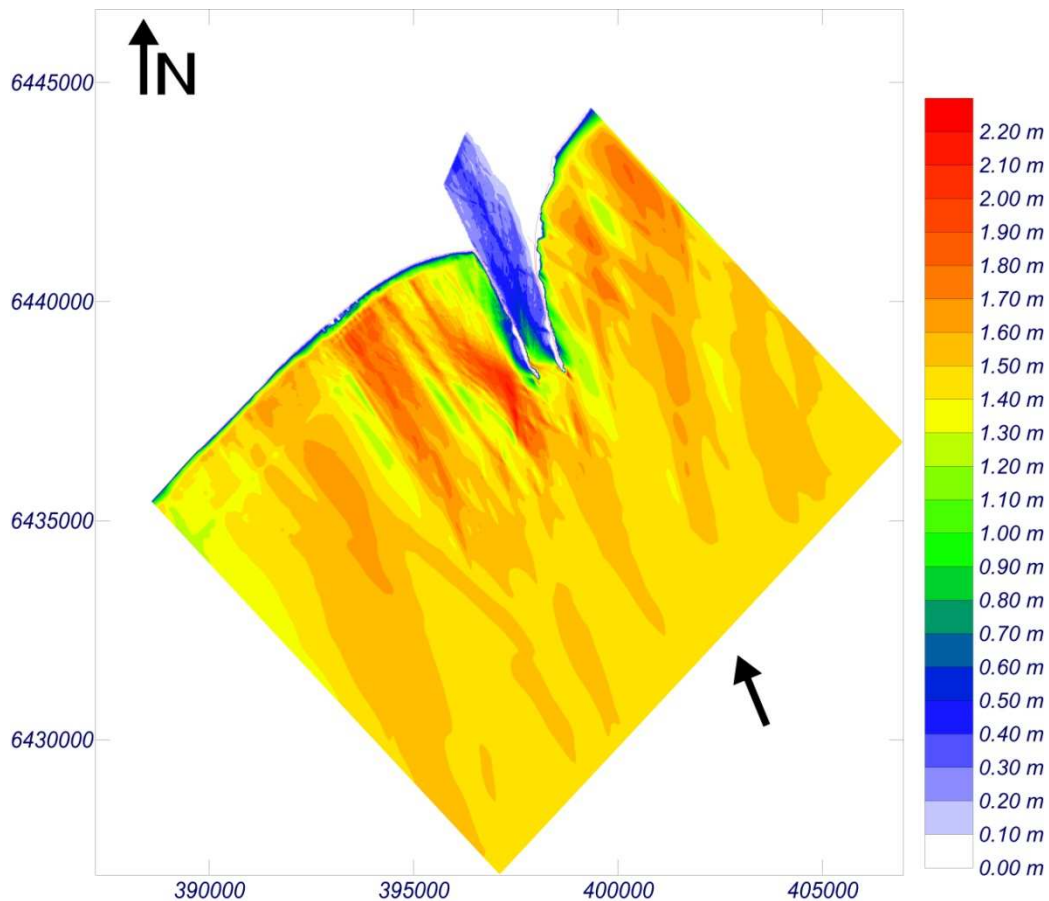


Figura 7. Distribuição dos campos de altura de onda ao longo da área de estudo.

O campo de correntes obtido pela modelagem no caso 02 é apresentado na Figura 8. Nesta simulação foi observada a convergência das correntes próxima ao molhe oeste, isto é explicado pela presença do banco de areia verificado na batimetria. O banco faz como que o fluxo seja deslocado para o centro da praia, intensificando a velocidade das correntes no local. No caso 02, as correntes longitudinais na praia demonstraram um padrão de escoamento no sentido sudoeste para nordeste, ao longo de toda a Praia do Cassino. Entre a EMA (Estação de Maricultura da FURG) e a estátua da Iemanjá, o fluxo alcançou maiores intensidades, em relação à área adjacente, apresentando máxima de 0,24 m/s. Em três pontos foram detectados

zonas de escape, ou seja, locais em que o fluxo incidente retornava para dentro da zona de antepraia. A primeira zona de retorno do fluxo foi verificada em frente à estátua de Iemanjá, a segunda na frente do terminal e, a terceira adjacente ao molhe oeste, esta já observada no caso 01. No cabeço dos molhes oeste e leste do canal do Porto de Rio Grande foi observado um intenso processo turbulento. No cabeço oeste a intensidade das correntes chegou em 0,30 m/s, no cabeço leste o processo observado foi mais intenso, alcançando aproximadamente 0,44 m/s.

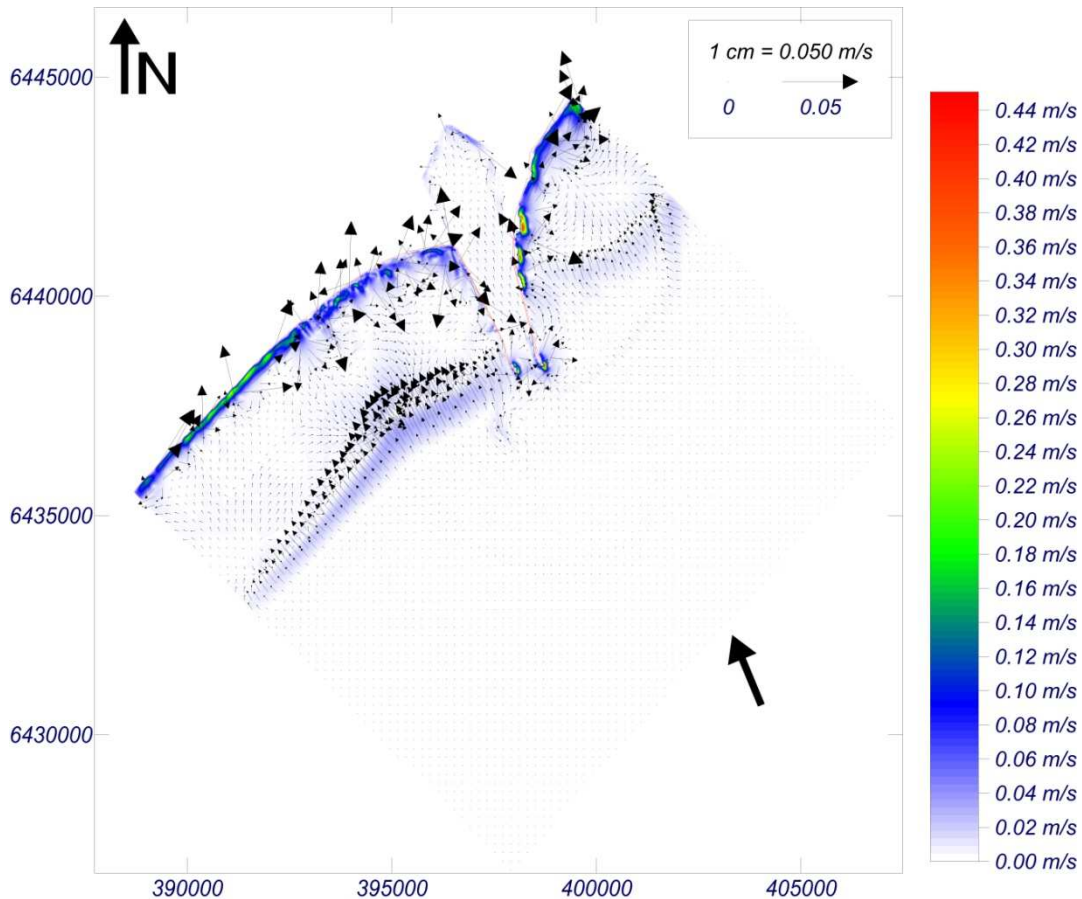


Figura 8. Distribuição dos campos de correntes ao longo da área de estudo.

O transporte de areia modelado para o caso 02 é apresentado na Figura 9. Neste caso a deriva litorânea manteve-se alinhada no sentido sudoeste para nordeste. A maior taxa de transporte foi observada entre a EMA e a estátua da Iemanjá, com taxas de 3,0 m³/h/m, isso porque neste local a velocidade das correntes modeladas também foi elevada, em relação à área adjacente. No local do banco de areia próximo ao cabeço do molhe oeste existe transporte de material, porém com intensidade muito baixa, cerca de 0,10 m³/h/m. Na região entre a estátua da Iemanjá e o molhe oeste da Praia do Cassino, as taxas de transporte de areia variaram entre 0,50 até 2,50 m³/h/m. Um padrão observado no transporte de areia ao longo da Praia do Cassino para este caso foi que o material é transportado em direção ao molhe oeste, desta forma acumulando material neste local e favorecendo a acresção da praia na região dos molhes.

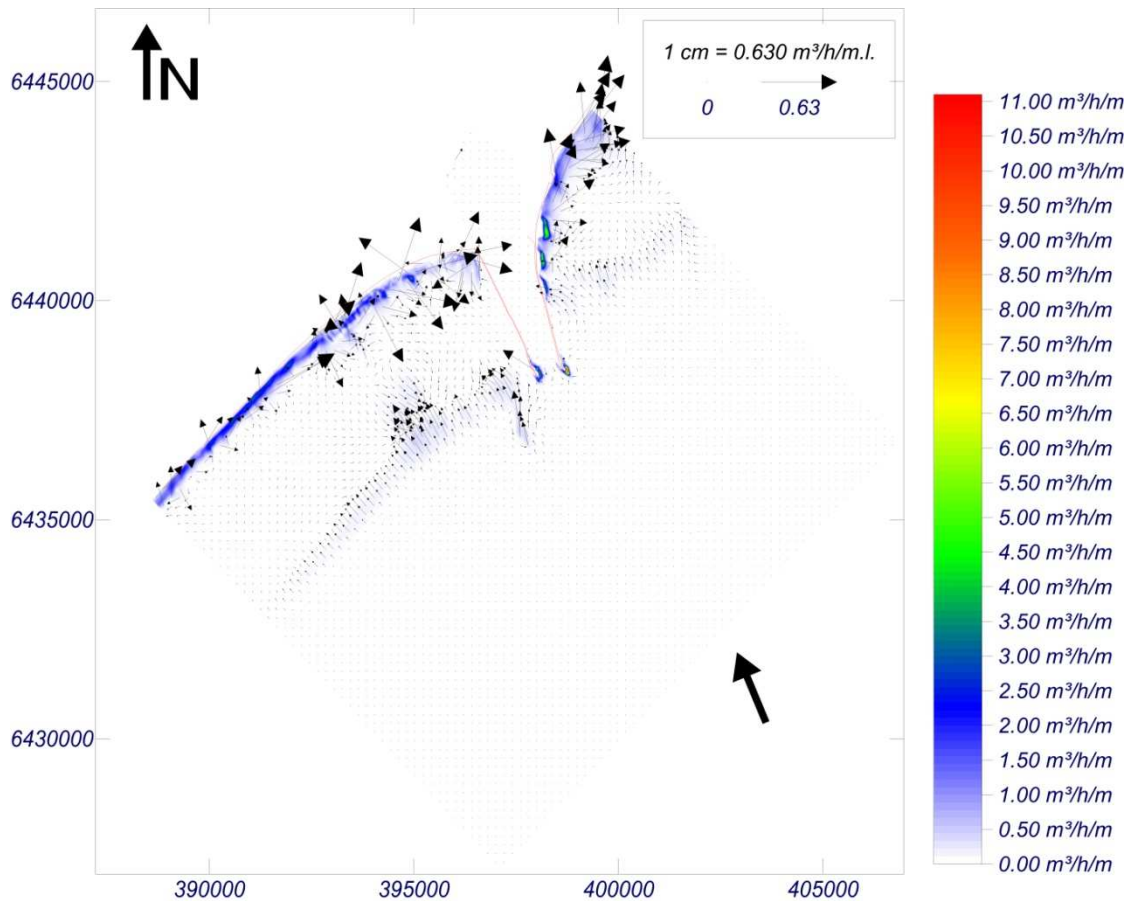


Figura 9. Distribuição do transporte de areia ao longo da área de estudo.

8. CONCLUSÕES

A modelagem do transporte de areia para a Praia do Cassino, através da utilização do Sistema de Modelagem Costeira, se mostrou uma ótima ferramenta para determinar a padrão do transporte no local. Os casos simulados neste trabalho foram baseados em condições que ocorrem freqüentemente no local, desta forma os resultados encontrados servem de base para entender como funciona o processo de transporte ao longo do ano.

As discrepâncias encontradas entre os dados modelados e medidos por Fontoura [3] na validação do modelo podem ser explicadas pelas limitações do modelo utilizado. Como no local existe um intenso processo de transporte superficial de sedimentos, devido aos ventos locais serem intensos e constantes e, a declividade da praia ser extremamente suave ($0,5^\circ$), o valor encontrado já é subestimado em relação ao real.

Os resultados encontrados para as simulações dos casos 01 e 02 demonstraram-se significantes, representando importantes padrões de transporte de areia no local para as condições que ocorrem freqüentemente ao longo do ano.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. COWELL, P.J.; THOM, B.G., 1994. Morphodynamic of coastal evolution. In R.W.G. Carter and C.D. Woodroffe (editors), *Coastal Evolution*, Cambridge University Press, Cambridge, 33-86.
2. DELFT 3D. 2009. Functional Specifications. Published and Printed by: Deltares. The Netherlands.
3. FONTOURA, J. A. S. (2004). Hidrodinâmica costeira e quantificação do transporte longitudinal de sedimentos não coesivos na zona de surfe das praias adjacentes aos molhes da barra do Rio Grande, RS, Brasil. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 281 pp. Porto Alegre, Brasil.
4. GIOC, 2003a. Coastal Modelling System (SMC)– Reference and User Manual. State Coastal Office-Spanish Environmental Ministry and University of Cantabria, 82 (in Spanish).
5. GIOC, 2003b. Spectral Wave Propagation Model (Oluca-SP). State Coastal Office-Spanish Environmental Ministry and University of Cantabria, 170 (in Spanish).
6. GIOC, 2003c. Wave Induce Currents Model in the Surf Zone (Copla-SP). State Coastal Office-Spanish Environmental Ministry and University of Cantabria, 61 (in Spanish).
7. GIOC, 2003d. 2DH-Morphodynamic Evolution Model for Near Shore Areas (MOPLA). State Coastal Office-Spanish Environmental Ministry and University of Cantabria, 262 (in Spanish).
8. GIOC, 2003e. Erosion and Sedimentation Evolution Model (Eros). State Coastal Office Spanish Environmental Ministry and University of Cantabria, 55 (in Spanish).
9. GONZALES, M. MEDINA, R. GONZALES-ONDINAS, J. OSÓRIO, A. MÉNDEZ, F. GRÁCIA, E. 2007. An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. *Computers & Geosciences* 33(7): 916-931.
10. JUNG, G. B.; PEREIRA, P. S.; CALLIARI, L. J. 2005. Comportamento das correntes longitudinais na praia do Cassino, RS: Análise Durante o Experimento Cassino 2005.
11. Kirby, J.T. and R.A. Dalrymple (1983). A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of Stokes waves by mildly varying topography, *J. Fluid Mech.*, 136, 543-566.
12. Kirby, J.T. and R.A. Dalrymple (1984). Verification of a parabolic equation for propagation of weakly non-linear waves, *Coastal Engineering*, 219-232.
13. Kirby, J.T. (1986). Higher-order approximations in the parabolic equation method for water waves, *Journal of Geophysical Research*, 91, C1, 933-952.

14. Kirby, J.T. and H.T. Özkan (1994). Combined refraction/diffraction model for spectral wave conditions. Ref/Dif s version 1.1. Documentation and user's manual, report No. CACR-94-04, Center Applied Coastal Research, University of Delaware.
15. LIU, P.L.F.; TSAY, T.K. 1984. On weak reflection of water waves, *Journal Fluid Mech.*, 131, 59-71.
16. SIEGLE, E.; CALLIARI, L. J. 2008. High-Energy events and short-term changes in superficial beach sediments. *Brazilian Journal of Oceanography*. 56 (2). P. 149 – 152.
17. SOULSBY, R. (1997). *Dynamics of marine sands*. Thomas Telford Publications, Londres.
18. STRAUCH, J. C. 1997. Monitoramento de ondas em Rio Grande. *XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Vitória, ES, v. 04, p. 385-391.
19. STRAUCH, J. C. 2001. Caracterização do estado de mar em Rio Grande. *XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Aracajú, SE.
20. STRAUCH, J. C.; CUCHIARA, D. C. TOLDO JR, E. E.; ALMEIDA, L. E. 2009. O padrão das ondas de verão e outono no litoral sul e norte do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v. 14 n°4. p. 29-37.
21. TABORDA, R. P. M. (1999). *Modelação da dinâmica sedimentar na plataforma continental portuguesa*. Tese de doutorado. Faculdade de Ciências Universidade de Lisboa. 366 pp. Lisboa, Portugal.
22. THORNTON, E.B.; GUZA, R.T. 1986. Surf zone longshore currents and random waves: Field data and model, *J. Physical Oceanography* 16, pp. 1165-1178.
23. TOMAZELLI, L. J.; DILLENBURG, S. R.; VILLWOCK, J. A. 2004. Geological Evolution of Rio Grande do Sul Coastal Plain, Sounthern Brazil. *Journal of Coastal Research*. ICS 2004 (Proceedings). P. 275 – 278.
24. WAINER, I. J. 1963. *Relatório Técnico - Análise e Previsão das Alturas de Onda em Tramandaí*. UFRGS, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH. Porto Alegre. 30 p.
25. VAN RIJN, L.C. 1993. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Acqua Publications, Amsterdam.