



UTILIZAÇÃO DO SISTEMA DE MODELAGEM COSTEIRA (SMC - BRASIL) NO ESTUDO DA DINÂMICA DO LITORAL DO MUNICÍPIO DE ARACAJU - SERGIPE

USE OF THE COASTAL MODELING SYSTEM (SMC - BRAZIL) IN THE STUDY OF THE DYNAMICS OF THE COAST OF THE ARACAJU - SERGIPE

UTILIZACIÓN DEL SISTEMA DE MODELADO COSTERO (SMC - BRASIL) EN EL ESTUDIO DE LA DINÁMICA DEL LITORAL DEL MUNICIPIO DE ARACAJU - SERGIPE

Tais Kalil Rodrigues

Professora Adjunta do Departamento de Geografia
da Universidade Federal de Sergipe (UFS)
E-mail: tkalilr@yahoo.com.br

José Maria Landim Dominguez

Professor Titular do Instituto de Geociências
da Universidade Federal da Bahia (UFBA)
E-mail: landim@ufba.br

RESUMO:

O estudo dos processos dinâmicos em ambientes costeiros é muito importante, uma vez que estes processos determinam a evolução destes ambientes. Este trabalho visa contribuir para uma avaliação da dinâmica marinha e sedimentar atuante na linha de costa do município de Aracaju, através da aplicação do Sistema de Modelagem Costeira (SMC), uma ferramenta que inclui um conjunto de metodologias e modelos numéricos que permitem estudar os processos costeiros e quantificar as variações que sofre o litoral como consequência de eventos naturais e/ou interferências humanas. O procedimento metodológico consistiu na propagação de ondas, correntes e transporte de sedimentos utilizando o módulo MOPLA do SMC. Dois principais sistemas de ondas, provenientes de leste-sudeste (ESE) e de Sudeste (SE), atuam na área investigada. As ondas mais frequentes são aquelas com altura significativa entre 1,0 e 1,5 m, e período de pico em torno de 5 e 8 s em 30,84% dos casos. Na maioria da linha de costa, os sentidos de transporte médio positivo nordeste-sudoeste (NE-SW) e negativo sudoeste – nordeste (SW-NE) são aproximadamente equivalentes, com um pequeno transporte líquido orientado de NE para SW. Divergências no sentido do transporte líquido foram verificadas nas Praias do Refúgio-Mosqueiro e da Coroa do Meio. Estes são, portanto, os dois trechos que apresentam a maior vulnerabilidade a um eventual incremento na frequência de eventos extremos e subida no nível do mar. Os resultados obtidos permitirão um melhor planejamento da ocupação da linha de costa do município de Aracaju.

Palavras-chave: erosão; ondas; refração.

ABSTRACT:

The study of the dynamic processes in coastal environments is very important, since these processes determine the evolution of these environments. This work aims to contribute to an assessment of the marine and sedimentary dynamics in the coastal line of the city of Aracaju, through the application of the Coastal Modeling System (SMC), a tool that includes a set of methodologies and numerical models that allow studying the processes and quantify the variations that the coast suffers as a consequence of natural events and / or human interference. The methodological procedure consisted in the propagation of waves, currents and sediment transport using the MOPLA module of the SMC. Two main wave systems, from east-southeast (ESE) and Southeast (SE), operate in the area investigated. The most frequent waves are those with significant height between 1.0 and 1.5 m, and peak period around 5 and 8 s in 30.84% of the cases. In most of the coastline, the mean positive mean transport Northeast-Southwest (NE-SW) and Southwest-Northeast

negative (SW-NE) are approximately equivalent, with a small liquid transport oriented from NE to SW. Divergences in the direction of net transport were verified in Refúgio-Mosqueiro and Coroa do Meio beaches. These are, therefore, the two stretches that present the greatest vulnerability to a possible increase in the frequency of extreme events and rise at sea level. The results obtained will allow a better planning of the occupation of the coastline of the city of Aracaju.

Keywords: erosion; waves; refraction.

RESUMEN:

El estudio de los procesos dinámicos en ambientes costeros es muy importante, ya que estos procesos determinan la evolución de estos ambientes. Este trabajo pretende contribuir a una evaluación de la dinámica marina y sedimentaria actuante en la línea de costa del municipio de Aracaju, a través de la aplicación del Sistema de Modelado Costero (SMC), una herramienta que incluye un conjunto de metodologías y modelos numéricos que permiten estudiar los procesos costeros y cuantificar las variaciones que sufre el litoral como consecuencia de eventos naturales y / o interferencias humanas. El procedimiento metodológico consistió en la propagación de ondas, corrientes y transporte de sedimentos utilizando el módulo MOPLA del SMC. Dos principales sistemas de olas, de este-sureste (ESE) y de Sudeste (SE), actúan en el área investigada. Las ondas más frecuentes son aquellas con una altura significativa entre 1,0 y 1,5 m, y un período de pico en torno a 5 y 8 s en el 30,84% de los casos. En la mayoría de la línea de costa, los sentidos de transporte medio positivo noreste-suroeste (NE-SW) y negativo suroeste-nordeste (SW-NE) son aproximadamente equivalentes, con un pequeño transporte líquido orientado de NE a SW. Las divergencias en el sentido del transporte neto se verificaron en las Playas del Refúgio-Mosqueiro y Coroa do Meio. Estos son, por lo tanto, los dos tramos que presentan la mayor vulnerabilidad a un eventual incremento en la frecuencia de eventos extremos y subida del nivel del mar. Los resultados obtenidos permitirán una mejor planificación de la ocupación de la línea de costa del municipio de Aracaju.

Palabras clave: erosión; olas; refracción.

1 INTRODUÇÃO

A dinâmica costeira é a principal responsável pelos processos de erosão e/ou deposição em áreas litorâneas. Os ventos, as ondas e as correntes atuam ininterruptamente sobre os materiais inconsolidados, erodindo-os, transportando-os e depositando-os. Para a preservação das praias e a manutenção de propriedades costeiras é necessário o entendimento da dinâmica costeira (KOMAR, 1998).

No Brasil, a escassez de dados de clima de ondas, em séries temporais longas e contínuas, dificulta as análises dos aspectos morfodinâmicos das praias (ALMEIDA *et al.*, 2013).

Com o intuito de estabelecer alternativas que possibilitem uma melhor compreensão das causas e mitigação dos processos erosivos em todo litoral brasileiro, os governos brasileiro e espanhol firmaram em 2010 o Acordo de Cooperação Técnica, Científica e Tecnológica para executar o Projeto “Transferência de Metodologias e Ferramentas de Apoio à Gestão da Costa Brasileira (SMC-Brasil)”. O Sistema de Modelagem Costeira (SMC), desenvolvido pelos pesquisadores do IH-Cantábria para o Ministério de Meio Ambiente Espanhol, é uma ferramenta que inclui um conjunto de metodologias e modelos numéricos, que permitem estudar os processos costeiros e quantificar as variações que sofre o litoral como consequência de eventos naturais ou de

atuações humanas na costa (IH CANTABRIA, 2003). O Sistema de Modelagem Costeiro (SMC-Brasil) também contempla uma base de dados de ondas, com série temporal de 60 anos, de 1948 a 2008, e com resolução horária, visando cobrir a lacuna existente (CAMUS *et al.*, 2013).

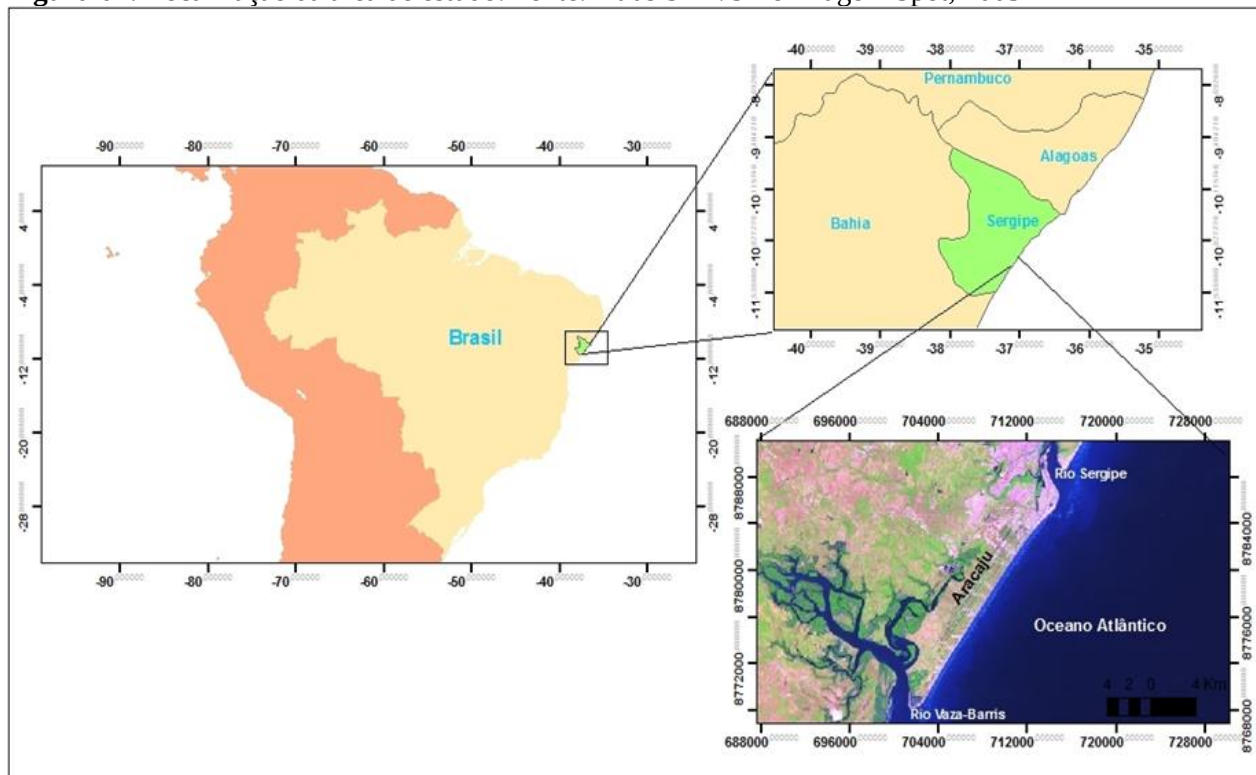
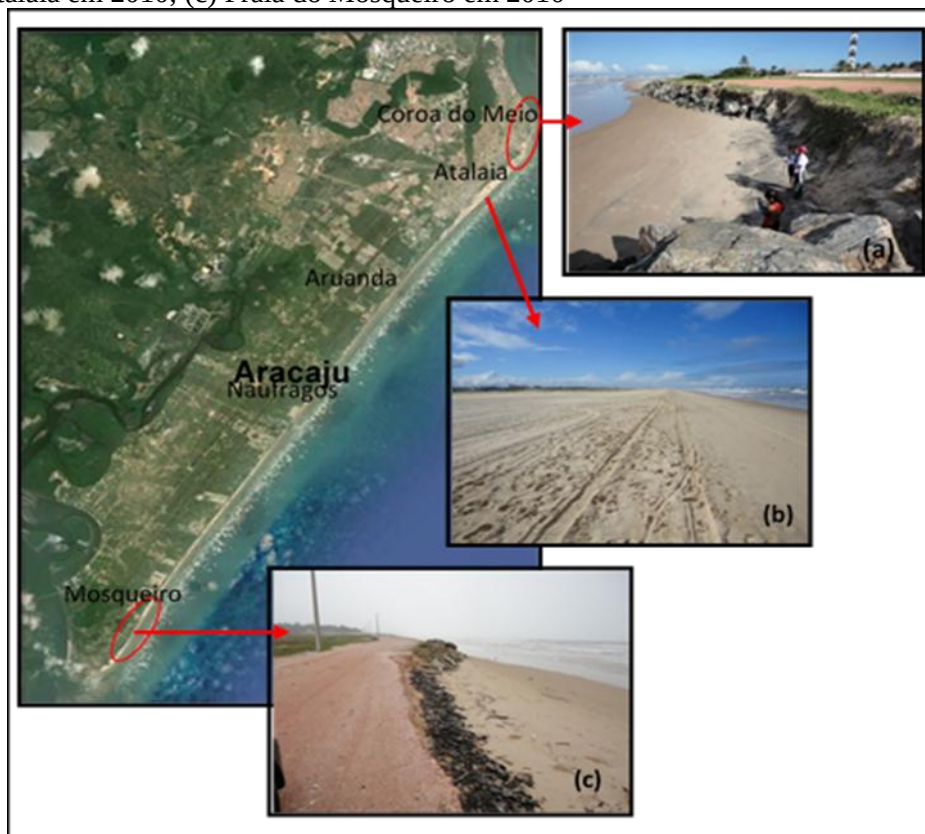
Estudos realizados no Estado de Sergipe sobre a evolução da linha de costa de longo prazo demonstraram que esta se encontra em progradação desde 5.100 anos A.P. (antes do presente) (BITTENCOURT *et al.*, 1983; DOMINGUEZ; BITTENCOURT; MARTIN, 1992). No entanto, quando a evolução costeira é examinada em médio prazo, alguns setores do litoral sergipano apresentam-se em erosão, outros em progradação e outros em equilíbrio. Os setores que apresentaram maior variabilidade nas últimas décadas encontram-se associados às desembocaduras fluviais (OLIVEIRA, 2003; BITTENCOURT *et al.*, 2006; RODRIGUES, 2008).

Este trabalho tem como objetivo compreender a dinâmica litorânea do município de Aracaju, utilizando o Sistema de Modelagem Costeiro (SMC-Brasil). Segundo Silva *et al.* (2012), a definição dos padrões de dispersão de sedimentos e a distribuição de energia da onda ao longo da costa, contribuem para a previsão de possíveis mudanças na configuração da linha de costa, evitando ou minimizando as perdas físicas e econômicas. Este conhecimento é muito importante, também, para a instalação de obras de engenharia ao longo da costa.

2 ÁREA DE ESTUDO

O município de Aracaju, localizado entre as desembocaduras dos rios Sergipe e Vaza-Barris, possui cerca de 24 km de extensão de linha de costa (Figura 01). Engloba, de norte para sul, as Praias da Coroa do Meio, Atalaia, Aruana, Refúgio, Náufragos e Mosqueiro. Essas praias apresentam larguras distintas, de poucos metros, a exemplo das Praias da Coroa do Meio e do Mosqueiro, a mais de 200 m, como a Praia da Atalaia. As Praias da Coroa do Meio e do Mosqueiro, adjacentes às desembocaduras dos rios Sergipe e Vaza-Barris, respectivamente, apresentam estruturas de contenção à erosão costeira (Figura 02). As suas linhas de costa, que na década de 50/60 apresentavam na sua retaguarda apenas manguezais e dunas, foram modificadas pelas atividades antrópicas, sem que fossem analisadas as consequências que isso traria a dinâmica costeira (RODRIGUES, 2008).



Figura 01: Localização da área de estudo. Fonte: Atlas SRH/SE e Imagem Spot, 2005**Figura 02:** Variação da largura da praia ao longo da área de estudo: (a) Praia da Coroa do Meio em 2010; (b) Praia da Atalaia em 2010; (c) Praia do Mosqueiro em 2010**Fonte:** Imagem Landsat 2013 (Google Earth) e fotos do Laboratório de Estudos Costeiros - UFBA

A planície costeira da região segue o modelo clássico das costas que avançam no sentido do oceano, em decorrência do acréscimo de sedimentos mais novos, em que cada cordão litorâneo representa depósitos individuais associados a uma antiga linha de praia (DOMINGUEZ *et al.*, 1992). A área investigada inclui sedimentos quaternários de idades pleistocênica e holocênica, depositados em ambientes marinho, flúviomarinho, lacustre e eólico (BITTENCOURT *et al.*, 1983), e engloba formações como manguezais, dunas, terraços marinhos, entre outros.

Os processos morfodinâmicos, representados pelas ondas, correntes costeiras e marés, exercem influência na modelagem costeira. As praias sob influência das desembocaduras dos rios Sergipe e Vaza-Barris sofrem variações que são atribuídas às mudanças na morfologia do delta de maré vazante, e à migração lateral da desembocadura (RODRIGUES, 2008).

A interferência antrópica, que se intensificou desde a metade do século XX, atua como agente modificador das feições morfológicas costeiras e da sua dinâmica. Na área em estudo, em especial a sul do município, nas Praias da Coroa do Meio e da Atalaia, existe um elevado número de obras de engenharia costeira. Cabe destacar que desde 1986, foi construída uma rodovia que bordeja toda a linha de costa do município (rodovia José Sarney), a qual em alguns trechos quase alcança a berma praial. A Figura 03 mostra alguns aspectos históricos do litoral de Aracaju.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foi necessário à realização de coletas em campo, análise granulométrica dos sedimentos e utilização do Sistema de Modelagem Costeira (SMC) para a compreensão da dinâmica marinha e sedimentar da área em estudo.

3.1 Trabalho de campo

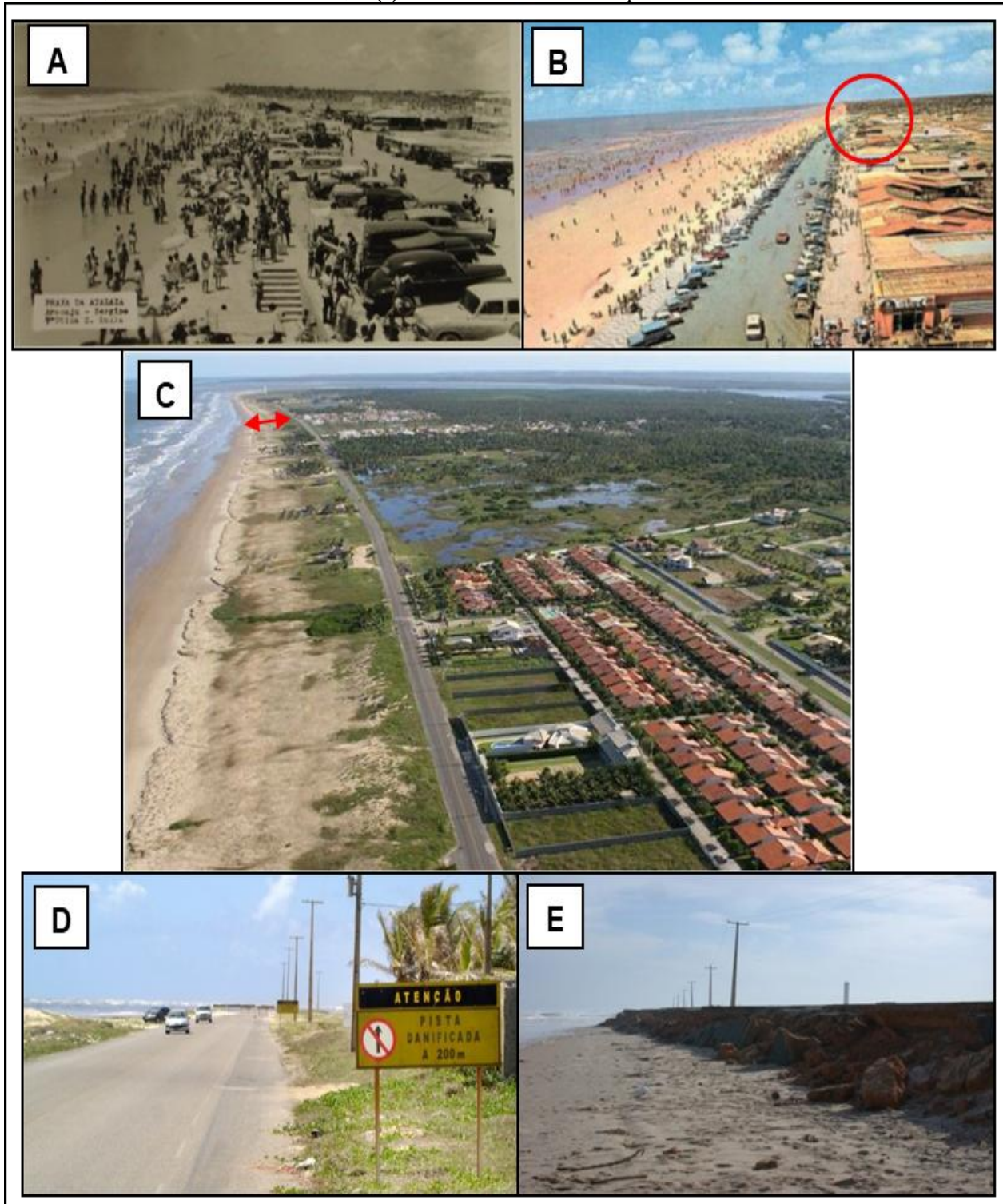
O trabalho de campo, realizado em 2010, consistiu na coleta de amostras de sedimento na porção intermediária da face da praia, com cerca de 300 g cada, nos 2 cm superficiais, em intervalos de aproximadamente 1 km, totalizando 24 pontos.

A linha de costa foi demarcada nos locais de coleta com o uso de GPS, utilizando como delimitação o ponto de separação entre a praia seca e a praia úmida que, segundo Esteves (2004), é o indicador da linha de costa mais utilizado, em razão de ser uma área contínua e possível de ser mapeada, de fácil identificação e reprodução por diferentes indivíduos, por apresentar consistência



ao ser monitorada através de diferentes métodos, além de possibilitar uma representação confiável de mudanças na linha de costa ao longo do tempo.

Figura 03: (a) Praia de Atalaia na década de 60; (b) Visão da Praia de Atalaia nos anos 70/80, em destaque (círculo vermelho) o local no qual a rodovia José Sarney foi construída; (c) Rodovia José Sarney na década de 90, a seta indica a distância da pista para a face de praia, antes da erosão; (d) Visão da rodovia danificada, erosão iniciada em 2004; e (e) Pista destruída no Mosqueiro em 2006



Fonte: (a) Foto: Acervo A. Gentil; (b) Foto: Arivaldo Azevedo; (c) Foto: autor desconhecido; (d) Foto: Ascom do DER; (e) Foto: da autora

3.2 Análise granulométrica dos sedimentos

As amostras de sedimento foram submetidas à análise por peneiramento a seco, segundo o procedimento padrão descrito por Briggs (1977). A distribuição das amostras de sedimento em classes granulométricas foi efetuada estatisticamente por meio da utilização do programa Sistemas de Análises Granulométricas (SYSGRAN), que é disponibilizado gratuitamente. O SYSGRAN fornece o diâmetro médio, o selecionamento, a assimetria e a curtose dos sedimentos, segundo o método padrão descrito por Folk e Ward (1957).

3.3 Utilização do Sistema de Modelagem Costeira – SMC – Brasil 3.0: análise da dinâmica marinha e sedimentar

3.3.1 Propagação de ondas e correntes

A modelagem de ondas utilizou a base de dados batimétricos obtida a partir do módulo IH-DATA (BACO) do SMC Tools, um dos módulos do SMC-Brasil, que utiliza dados fornecidos pelas cartas náuticas brasileiras (IH CANTABRIA, 2013). Para caracterização do clima de ondas, o SMC disponibiliza um banco de dados denominado *Downscaled Ocean Waves* (DOW), obtido a partir do processo de propagação de ondas de águas profundas para águas intermediárias (*downscaling*), dos dados do *Global Ocean Waves* (GOW), referentes a uma série temporal de 1948 a 2008.

Desta forma, na caracterização do clima marítimo da região, diversos pontos DOW foram avaliados, em águas intermediárias (profundidades entre 13 e 28 m), em função das possíveis interferências nos resultados da modelagem, sendo que todos apresentaram dados similares. Devido a limitações do modelo de propagação, característico para estudos com área limitada e efeitos locais, não é possível a propagação partindo-se de malhas tão amplas (águas profundas). Deste modo, foi necessário definir o ponto inicial de propagação em águas intermediárias.

A análise estatística de ondas para a região marinha da área de estudo, em termos de condições médias e extremas, foi realizada para um ponto DOW (ponto P1) com cota batimétrica de 26,9 m, na latitude -11,117°S (8770294 UTM) e longitude -36,997°W (718727 UTM), utilizando o módulo AMEVA do SMC-Brasil. Assim, foram geradas informações sobre alturas de onda significativa (H_s), maré meteorológica (MM), maré astronômica (MA), períodos de pico (T_p) e direções de onda (Dir). Posteriormente, foi realizada a análise de frequência dos eventos extremos



da série temporal de ondas, ajustando-se uma curva de distribuição de probabilidades GEV aos valores máximos anuais de período e altura de onda, para se obter os períodos de retorno (intervalos de recorrência), respectivamente, dos períodos e das alturas de ondas de diferentes magnitudes.

A partir do pré-processo de modelagem foram identificadas as frentes-de-onda mais significativas para a região, sendo criadas duas malhas, com espaçamento de 25 x 25m, para propagação de ondas vindas dos quadrantes de leste (E), de leste-sudeste (ESE), de sudeste (SE) e sul-sudeste (SSE), as quais são as mais significativas para o local estudado. Foi avaliado então o comportamento das ondas em condições normais e de tempestade para as quatro direções predominantes em águas intermediárias (E, ESE, SE e SSE), para se investigar o processo de refração e difração das ondas. A partir do modelo OLUCA do SMC-Brasil foi realizada a propagação de ondas até a linha de costa, sendo considerados 150 casos de propagação, indicados pelo programa como situações de altura e direção de ondas de ocorrência mais representativos do clima de ondas em águas intermediárias no ponto DOW escolhido, para situações de preamar, maré intermediária e baixamar.

Como o SMC apresenta restrições, tais como, a resolução espacial adequada ao comprimento de onda, que limita as dimensões das malhas tornando-as aplicáveis a domínios menores, a propagação principal das ondas restrita à direção X e o giro das ondas circunscrito à $\pm 55^\circ$, e a instabilidade das ondas que viajam em direção aos contornos das malhas e se encontram com batimetria que não decresce, foi necessária a divisão da área de estudo em duas, de modo a respeitar os limites de malha, para uma área de aproximadamente 10 km de extensão. Desta forma temos: (i) **área 01**: correspondente à porção norte próximo à desembocadura do rio Sergipe, incluindo as Praias da Coroa do Meio e Atalaia (Figura 04); e (ii) **área 02**: correspondente à porção sul, próxima à desembocadura do rio Vaza-Barris, incluindo as Praias do Mosqueiro, Refúgio e Naufrago (Figura 05).

Para a área de estudo, as taxas de transporte litorâneo foram calculadas para 11 perfis distribuídos ao longo da linha de costa. Para cada um dos perfis foi necessário determinar as características das ondas na zona de arrebentação, assim como as correntes longitudinais. As ondas em água intermediárias foram propagadas até a posição do perfil no ponto da arrebentação, quando então foram calculadas as taxas de transporte potencial longitudinal hora a hora utilizando a formulação do CERC (1984).

Figura 04: Malhas para área 01, A (E e ESE) e B (SE e SSE)

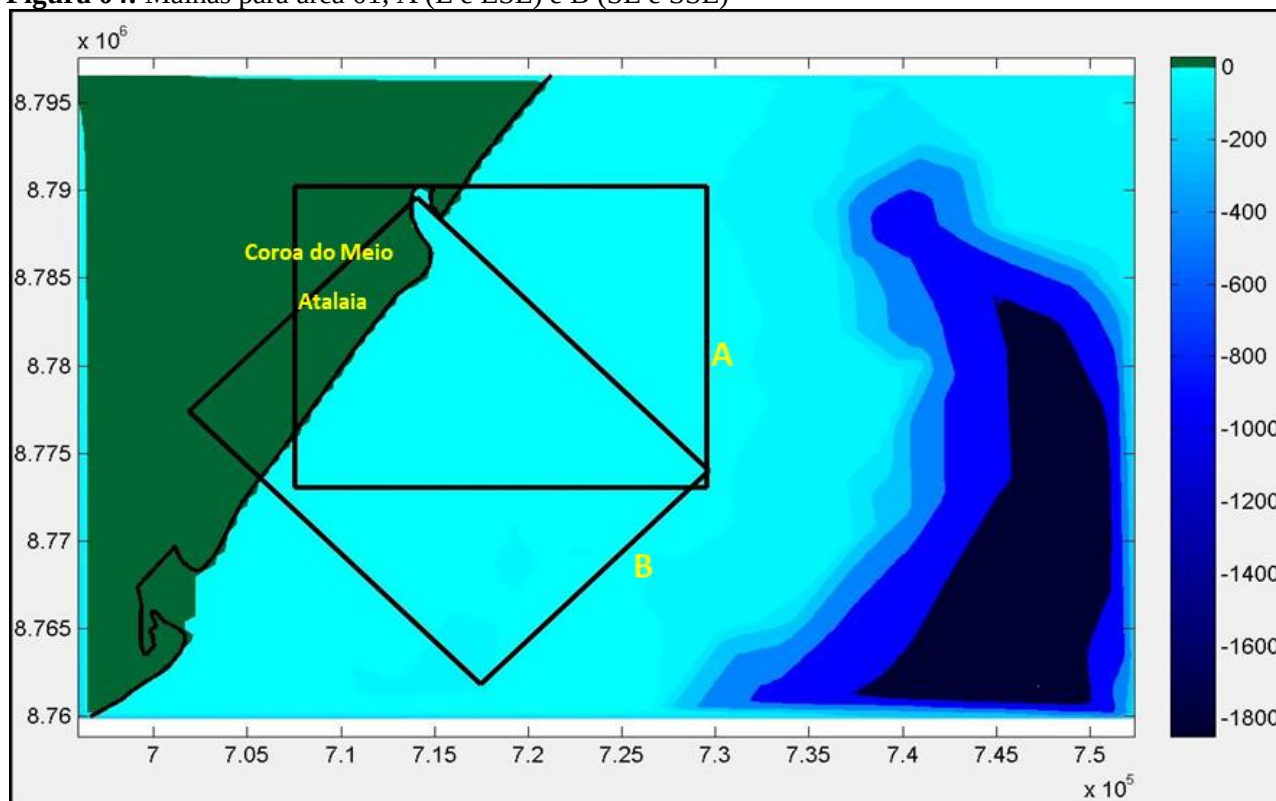
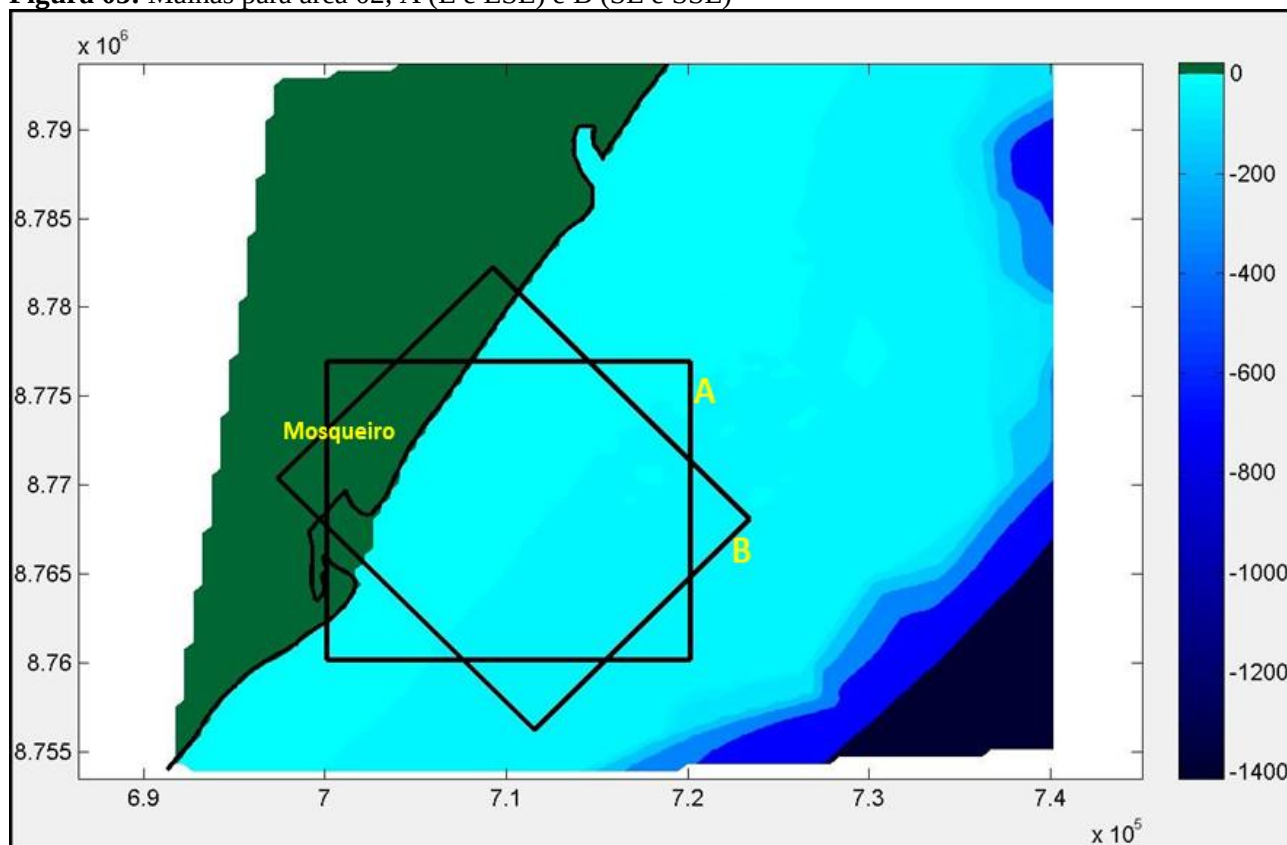


Figura 05: Malhas para área 02, A (E e ESE) e B (SE e SSE)



3.3.2 Transporte e Fluxos médios

Ao longo destes perfis foi calculado o transporte de sedimentos, considerando o tamanho médio (D50) obtido através das análises granulométricas. Para este cálculo foi considerada a média anual de ondas de toda a série temporal estudada, com base nas equações de Bayram *et al.* (2007), que supõe que o sedimento é suspenso pela ação da quebra das ondas e transportado por qualquer tipo de corrente longitudinal.

3.4 Integração dos dados

A integração dos dados gerados nas etapas anteriores com a aplicação do SMC-Brasil permitiu a identificação dos trechos de linha de costa onde os processos costeiros atuam de forma mais intensa, áreas afetadas pela inundação e/ou sobrelevagem das ondas em eventos de tempestades. Com isto, tem-se como resultado os trechos da linha de costa mais vulneráveis as mudanças climáticas.

4 RESULTADOS

4.1 Dinâmica marinha

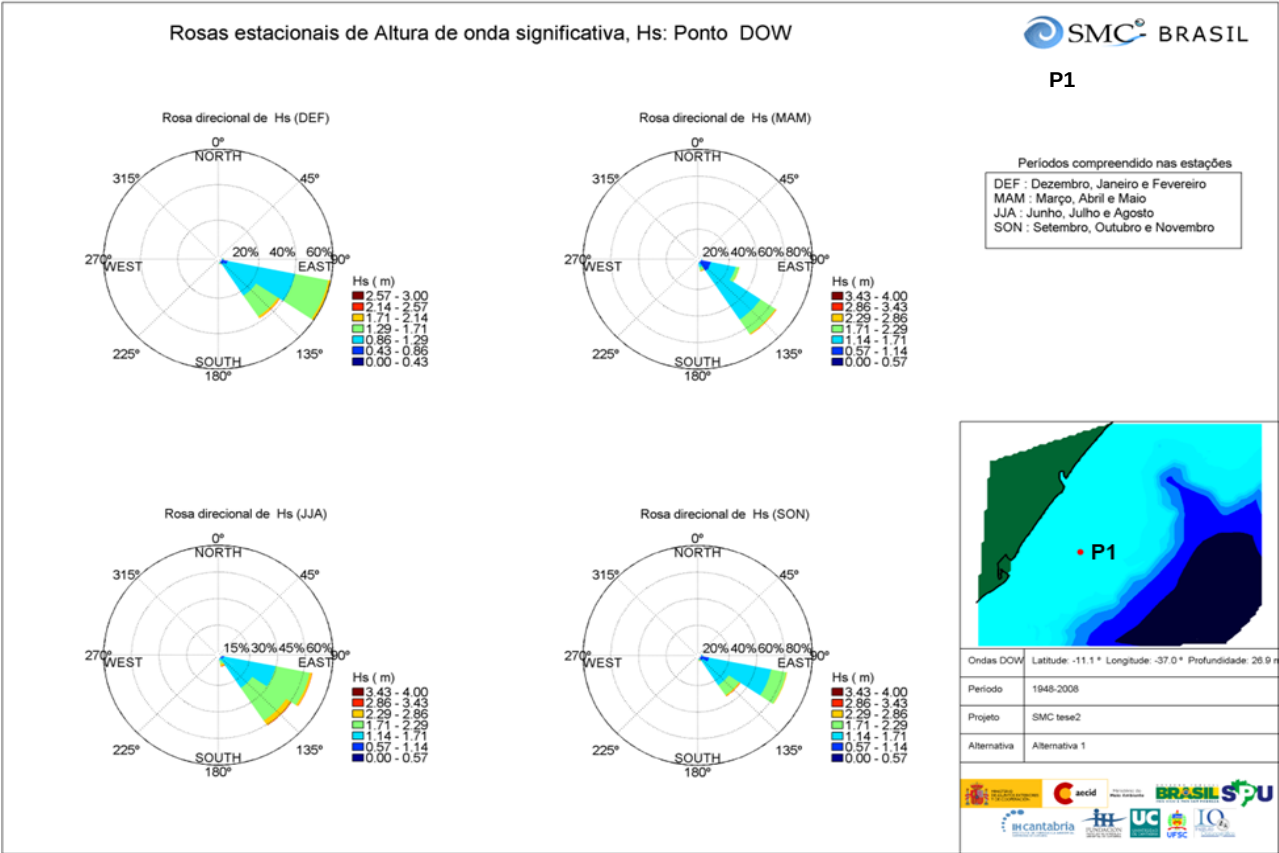
Utilizando-se os dados da base do SMC-Brasil, no período entre 1948 e 2008, no ponto P1, verifica-se que duas direções de ondas são predominantes; aquelas provenientes de leste-sudeste (ESE) e as de sudeste (SE), que juntas representam mais de 95% das ondas incidentes neste ponto (Tabela 01). Porém, estão também presentes ondulações de leste (E) e sul-sudeste (SSE). A altura de onda em condições de temporais anuais (H_{s12}) e os períodos de pico para as condições de tempestade (T_{p12}) variam consideravelmente entre as quatro principais direções. Para as ondas de tempestade provenientes de SSE, o período de pico é de 16,2s e a altura é de 3,3m; enquanto que, para as ondas de tempestade provenientes de E, o período de pico é de 9,6s e a altura é de 1,9m. Para as condições médias, a altura de onda significativa ($H_{s50\%}$) variou de 1,2 a 1,7m e o período de pico ($T_{p50\%}$) de 7,0 a 9,0s, dependendo da direção das ondas.

Tabela 01: Caracterização do clima de ondas do ponto P1

Direção	Prob. Direção	Hs50%	Tp50%	Hs12	Tp12
E	0,0043	1.2007	7.0185	1.9455	9.6685
ESSE	0,5001	1.4004	7.9013	2.5199	12.1385
SE	0,4593	1.5010	8.0211	2.8440	15.7044
SSE	0,0363	1.7882	9.0426	3.3123	16.2673

Na Figura 06 estão representadas as rosas de ondas, separadas por estações do ano. As ondas provenientes de ESE predominam na primavera e verão. Durante o outono, a predominância é de ondas de SE. No inverno, as ondas de ESE e SE ocorrem quase que na mesma proporção e os maiores valores de altura de onda são observados.

Figura 06: Rosas de ondas do ponto P1 para cada estação do ano: Verão (dezembro, janeiro e fevereiro); Outono (março, abril e maio); Inverno (junho, julho e agosto) e Primavera (setembro, outubro e novembro).



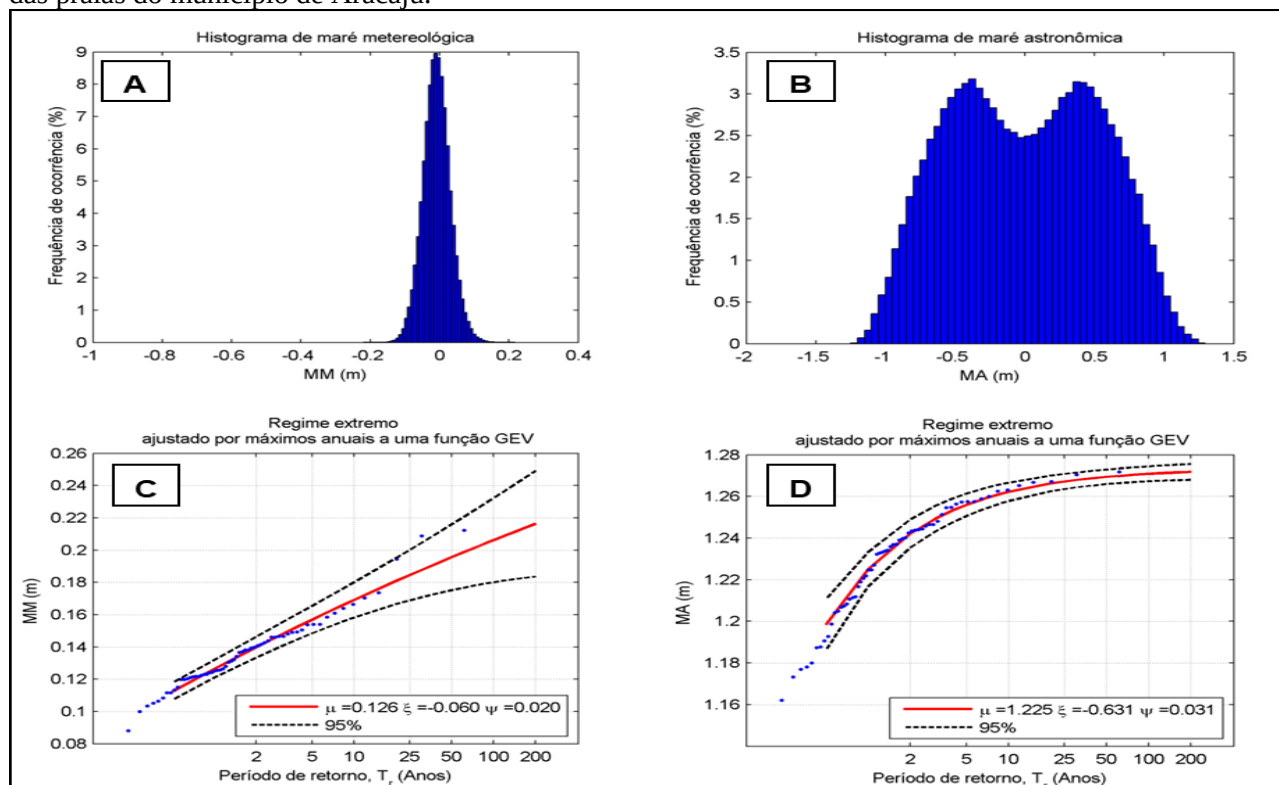
A altura de onda significativa (Hs) varia entre 0,5 m e 3,5 m, sendo que 92,36% dos estados de mar apresentam ondas inferiores a 2,0 m. O período de pico (Tp) varia entre 2 s e 17 s, sendo que



95,52% dos estados de mar apresentam períodos de pico inferiores a 11 s. As relações entre a altura de onda significativa H_s com o período de pico T_p e direção, verificada na distribuição conjunta H_s - T_p e H_s -Dir, indicam que as ondas mais frequentes tem alturas significativas entre 1,0 e 1,5 m, e período de pico em torno de 5 e 8 s em 30,84% dos casos.

Os resultados mostram que o regime de oscilação do nível do mar é principalmente governado pela maré astronômica, com oscilações entre $\pm 1,4$ m, enquanto que as marés meteorológicas oscilam entre $\pm 0,1$ m, com influência quase negligenciável (Figuras 7A e B). Para se determinar o regime escalar extremo desses parâmetros, foi aplicada a distribuição dos extremos generalizada que superam 99,5% das frequências. Para um período de retorno de 10 anos, os valores das marés meteorológica (MM) e astronômica (MA) se mantiveram praticamente iguais às médias observadas, com 0,16 metros e 1,26 metros, respectivamente, em águas profundas, em frente às praias da área de estudo (Figuras 7C e D).

Figura 07: A e B. Histogramas de frequência para Maré Meteorológica e para Maré Astronômica no ponto DOW (P1). **C e D** representam os gráficos de valores extremos para Maré Meteorológica e para Maré Astronômica, respectivamente, com período de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 e 200 anos na região marinha das praias do município de Aracaju.

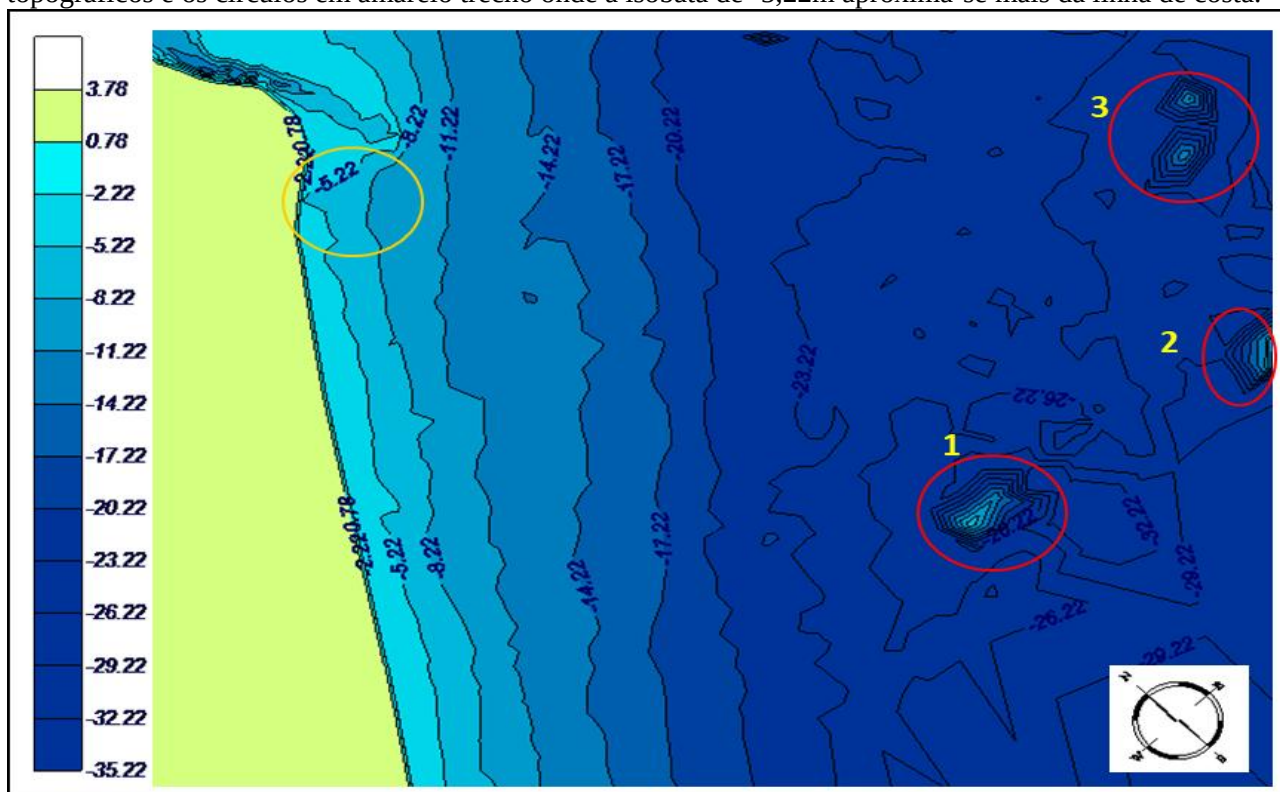


4.2 Padrão de refração de ondas sob condições de tempestade e condições médias

A partir dos dados obtidos para o ponto P1, os espectros de ondas foram propagados utilizando o Modelo de Propagação de Ondas Espectral (OLUCA-SP), do SMC-Brasil. As ondas alcançam uma profundidade que equivale à metade de seu comprimento, elas passam a sentir o fundo do mar, ocorrendo o fenômeno denominado refração de onda. Esse fenômeno é responsável por alterar a direção de propagação das ondas que chegam obliquamente em relação à batimetria, fazendo com que as frentes-de-onda sofram uma rotação sempre no sentido de alcançar a linha de costa frontalmente.

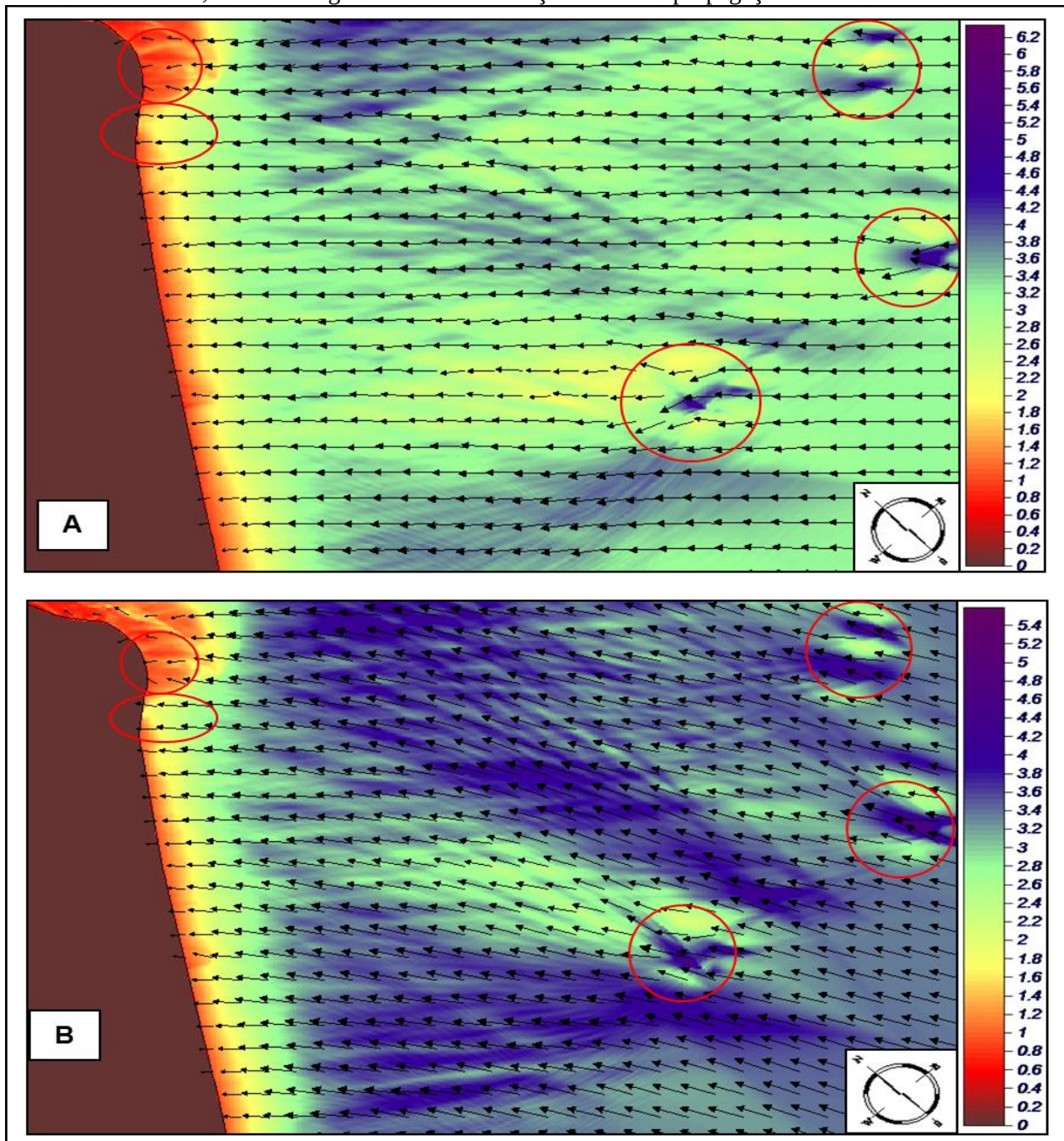
A modelagem da propagação de ondas de tempestade para as quatro direções principais, E (0,43%), ESE (50,01%), SE (45,93%) e SSE (3,63%), mostra que a presença de alguns altos topográficos, na plataforma continental, produzem efeitos de refração e difração nas ondas mais pronunciadas (Figura 08).

Figura 08: Batimetria da plataforma continental. Os círculos em vermelho (1, 2 e 3) representam altos topográficos e os círculos em amarelo trecho onde a isóbata de -5,22m aproxima-se mais da linha de costa.



A modo de exemplo, pode-se ver na figura 09 este efeito que é mais evidente na região da Praia de Atalaia (na área 1) sob condições de ondas de SE e SSE, que são as mais energéticas e apresentam as maiores alturas.

Figura 09: Área 01, em condições de tempestade. Em **A**: magnitudes de H_s e direção média de propagação das ondas de sudeste; e em **B**: magnitudes de H_s e direção média de propagação das ondas de sul-sudeste.



De modo geral, como era de se esperar, observa-se uma diminuição gradual da altura de ondas em direção à linha de costa. Entretanto, na Praia dos Atalaia, no trecho onde a isóbata de - 5,22m se aproxima da linha de costa (ver Figura 08), é criada uma espécie de “corredor” que permite que ondas com maiores alturas alcancem a linha de costa, o que fica bem evidente nos mapas de refração das ondas de sudeste e sul-sudeste (Figura 09).

A linha de costa do município de Aracaju é praticamente retilínea, com orientação de NE-SW, de modo que os principais trens de onda, após refratados, chegam quase paralelos à linha de costa. As convergências dos raios de ondas são perceptíveis nas regiões próximas às desembocaduras fluviais, principalmente do rio Sergipe, devido à presença de um amplo delta de maré vazante.

Os espectros de ondas associados às condições médias apresentam valores de altura de ondas significativas baixos (menores que 1,5m). Devido aos efeitos de fricção com o fundo e refração, estas ondulações perdem energia e chegam à linha de costa com valores ainda menores.

O efeito dos altos topográficos na transformação destas ondas é reduzido quando comparado à condição de ondas de tempestade. As ondas de SSE são as que experimentam um maior grau de refração antes de chegarem à linha de costa.

4.3 As correntes costeiras no litoral de Aracaju

A arrebentação das ondas combinada aos gradientes de altura de onda e incidência oblíqua das mesmas produz correntes costeiras que transportam água e sedimentos na zona de surfe.

Quanto maior a intensidade da corrente, maior o seu poder erosivo e maior o volume e o tamanho do sedimento que ela pode transportar. Por esta razão, as correntes do tipo longitudinais são comumente responsáveis por criar trechos em erosão e em progradação na linha de costa.

A modelagem do sistema circulatório na zona de surfe é necessária para que seja possível o entendimento do transporte de sedimentos e das variações morfológicas na linha de costa.

Os resultados da modelagem das correntes longitudinais para a área de estudo são apresentados para a situação de maré alta de sizígia (2,5m), sob regimes de ondas médios e de tempestade.

Sob condições de ondas médias, as correntes longitudinais apresentam menores intensidades quando comparadas às correntes produzidas sob condições de onda de tempestade, para as quatro direções avaliadas (E, ESE, SE e SSE).



As correntes geradas sob condições de tempestade produzem, na parte norte da Área 01, um vórtice que gira no sentido horário, devido à presença de bancos arenosos. As maiores velocidades de corrente ocorrem no trecho onde a isóbata de -5,22m se aproxima da linha de costa. Isto resulta também em uma divergência no sentido das correntes longitudinais neste trecho. Essa divergência foi verificada para todas as direções de onda propagadas tanto sob condições médias, quanto sob condições de tempestade.

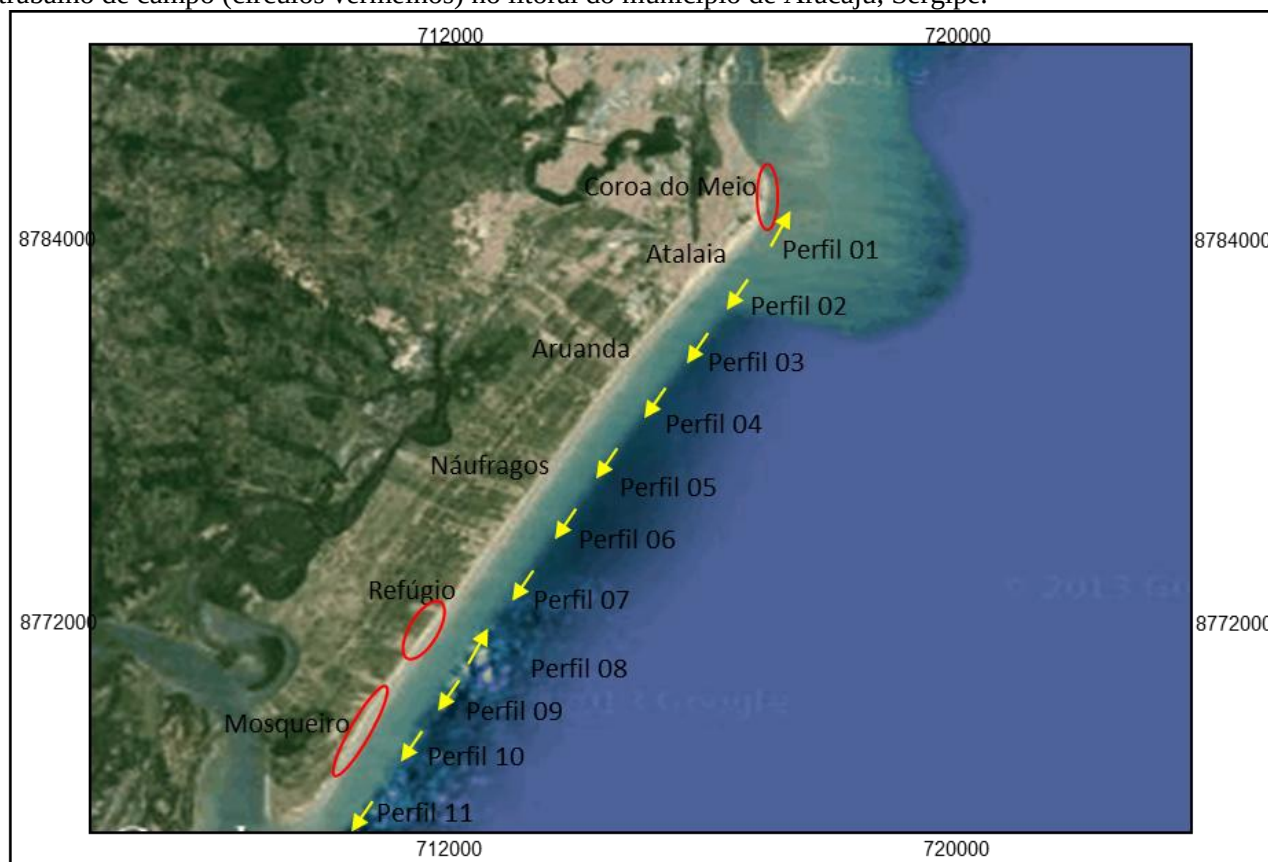
As correntes fluem de modo geral em todo o litoral do município de Aracaju de nordeste para sudoeste para ondas de leste (E) e leste-sudeste (ESE) e, no sentido inverso, para ondas de sudeste (SE) e sul-sudeste (SSE). A variação espacial das correntes longitudinais e transversais na área de estudo é função da direção de incidência das ondas, sendo que as maiores intensidades de correntes calculadas estão associadas aos locais em que as ondas apresentam maiores alturas.

4.4 Transporte litorâneo

Foram determinadas as direções das taxas médias anuais de transporte potencial líquido para os 11 perfis, no período de 1948 a 2008. Na maioria dos perfis o transporte médio líquido é direcionado de NE para SW, com exceção do perfil 1 e do perfil 8, que é direcionado de SW para NE.

Entre as Praias do Mosqueiro e Refúgio verifica-se uma divergência na direção do transporte de sedimentos e uma intensificação do transporte para SW. Na Praia da Coroa do Meio, onde também foi verificado durante trabalho de campo processo erosivo severo, uma outra zona de divergência está presente. Estas zonas de divergência são aparentemente a causa principal para os processos erosivos verificados ao longo do litoral de Aracaju. Para uma melhor compreensão e visualização na área como um todo, do transporte médio líquido de sedimentos gerado pelo SMC, a figura 10 apresenta o sentido do transporte potencial nos 11 perfis, e os trechos de linha de costa, que presentemente experimentam erosão, como verificado durante os trabalhos de campo.

Figura 10: Sentido do transporte médio líquido de sedimentos e as principais zonas de erosão verificadas em trabalho de campo (círculos vermelhos) no litoral do município de Aracaju, Sergipe.



4.5 Áreas vulneráveis à inundação durante ocorrência de tempestades

Durante as condições de alta energia (tempestades), o nível médio da água do mar aumenta como resultado do efeito combinado da maré, vento, pressão atmosférica e ondas. Nessas condições, a praia e as dunas (se existentes) são fortemente atacadas pelas ondas incidentes, e geralmente resultam em processos erosivos. Quando ondas de tempestade chegam à praia, estas quebram com muita intensidade, e como consequência, um grande volume de água é lançado sobre a face da praia (VAN RIJN, 2009).

A combinação em um evento de tempestades com maré meteorológica positiva, marés astronômicas de sizígia, e valores extremos de “run-up” de onda, pode resultar em galgamento do cordão dunar, obras de defesa costeira, avenidas e estradas. Desta forma, erosão e inundações podem ocorrer em áreas onde normalmente não ocorrem.

A integração dos dados permitiu identificar os trechos da área de estudo mais vulneráveis às mudanças climáticas. Estes dois trechos estão compreendidos entre as Praias da Coroa do Meio e de Atalaia e o entre as Praias do Refúgio e Mosqueiro. Nestas duas áreas se verificam as maiores

alturas de onda durante tempestades, e os maiores valores de transporte de sedimentos, com fluxos de correntes mais intensos.

Corroborando os resultados encontrados, durante a campanha de campo realizada no período de inverno e sob maré de sizígia foi possível observar que nesses dois trechos ocorre o galgamento do cordão duna e em alguns pontos da rodovia (Figura 11).

Figura 11: A e B Praia da Coroa do Meio; C e D Praia do Refúgio; E e F Praia do Mosqueiro



As dunas constituem-se um dos mais importantes e efetivos protetores naturais na costa, porém a resposta da praia aos eventos de tempestades varia notavelmente ao longo da mesma. A Praia do Mosqueiro é vulnerável, pois além de ser contígua à desembocadura do rio Vaza-Barris, as dunas frontais apresentam as menores alturas e larguras e em alguns pontos nem existem, visto que a rodovia foi construída em cima do cordão dunar e muito próxima da linha de preamar máxima.

Nas Praias do Refúgio e da Coroa do Meio, onde se verifica uma divergência no sentido da deriva litorânea, a construção de barracas de praia sobre as dunas frontais as tornam mais vulneráveis a eventos extremos e inundações, devido à falta de proteção que as mesmas ofereciam.

5 CONCLUSÕES

A utilização do SMC-Brasil para o estudo da dinâmica costeira do município de Aracaju mostrou que:

(i) Duas direções de ondas atuam predominantemente na área de estudo: leste-sudeste (ESE), e sudeste (SE), que juntas representam mais de 95% das ondas incidentes. As ondas de E e ESE apresentam as menores alturas, enquanto que as ondas de SE e SSE são as mais energéticas, com maiores alturas, e que experimentam as maiores modificações na direção de propagação em virtude do processo de refração.

(ii) O regime de oscilação do nível do mar é governado pela maré astronômica, com oscilações de $\pm 1,4$ m; enquanto que as marés meteorológicas oscilam entre $\pm 0,1$ m, e consequentemente, são negligenciáveis.

(iii) A presença de 3 altos topográficos na plataforma continental influencia a refração e difração das ondas, principalmente para ondas de tempestade de SE e SSE, porém como estão muito afastados seu efeito na linha de costa é reduzido.

(iv) O sentido de dispersão dos sedimentos de modo geral é para sudoeste (SW) gerado por ondas que são provenientes de leste (E) e de leste-sudeste (ESE). E para nordeste (NE) quando as ondas são sudeste (SE) e sul-sudeste (SSE).

(v) Na parte norte da Área 01, um vórtice no sentido horário se desenvolve devido à presença de bancos arenosos rasos circundados por profundidades maiores, o que resulta em divergência no sentido das correntes longitudinais neste trecho. Essa divergência ocorre para todos os quatro casos de ondas propagadas, sejam em condições normais médias, sejam durante tempestades.



(vi) Na maioria do trecho investigado, o transporte médio líquido positivo (NE-SW) e negativo (SW-NE) são aproximadamente equivalentes, porém com sentido predominante de NE para SW. Entre as Praias do Refúgio e do Mosqueiro, verificou-se uma divergência no sentido do transporte e um incremento na sua magnitude, o que favorece a retirada dos sedimentos e seu transporte no sentido sudoeste. Divergência no sentido do transporte foi verificada também na Praia da Coroa do Meio.

É possível concluir, então, que a área estudada apresenta dois trechos com maior vulnerabilidade à erosão costeira e, conseqüentemente, maior vulnerabilidade à sobrelavagem pelas ondas frente à elevação do nível do mar ou à intensificação de eventos extremos, resultantes das mudanças climáticas. Estes trechos estão compreendidos entre as Praias da Coroa do Meio e da Atalaia e entre as Praias do Refúgio e do Mosqueiro. As zonas de divergência e de intensificação do transporte litorâneo líquido de sedimentos são aparentemente a causa principal para os processos erosivos verificados ao longo do litoral de Aracaju.

Considerando que um aumento da frequência de eventos climáticos extremos implicará em um aumento na frequência e magnitude de ondas e marés meteorológicas maiores, é provável que ocorra um incremento nos processos de erosão costeira nos trechos mais vulneráveis do litoral. Neste contexto, o SMC representa uma importante ferramenta de gestão, contribuindo para a caracterização e compreensão do clima de ondas local.

Estes dados contribuirão para o desenvolvimento de trabalhos futuros, em virtude da escassez de trabalhos em escala de detalhe para a área em estudo. Fato este que impossibilitou comparações com outros resultados produzidos na mesma escala para área estudada.

O programa ainda apresenta algumas limitações, como foram citadas ao longo do texto, no entanto a aplicação de técnicas de modelagem e de bases de dados, como as fornecidas pelo SMC-Brasil, viabilizam a melhor avaliação das mudanças morfológicas nas praias induzidas por forçantes naturais (ondas, marés, correntes e ventos). A partir desse conhecimento, pode-se melhor planejar a ocupação em áreas costeiras, diminuindo os riscos de perdas socioeconômicas e minimizando os impactos decorrentes das mudanças ambientais.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é uma contribuição do inctAmbTropic - Instituto de Ciência e Tecnologia em Ambientes Marinhos Tropicais, Processo CNPq/FAPESB 565054/2010-4 and 8936/2011. Agradecemos ao Ministério do Meio Ambiente (MMA), Instituto de Hidráulica Ambiental da

Cantabria (IHCantabria) da Universidad de Cantabria, Ministério de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente da Espanha, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Universidade de São Paulo (USP), pelo patrocínio, desenvolvimento, disponibilização, incentivo e disseminação do SMC-Brasil.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. R. 2013. Estudio de dinámica litoral y evolución de la zona sur de la Playa de Piçarras (Santa Catarina/Brasil). **Dissertação de Mestrado**, Universidad de Cantabria, Santander, Espanha.

BAYRAM, A.; LARSON, M.; HANSON, H. 2007. A new formula for the total longshore sediment transport rate. **Coastal Engineering**, v. 540, n. 9, p. 700-710.

BITTENCOURT, A. C. S. P.; MARTIN, L.; DOMINGUEZ J. M. L.; FERREIRA Y. M. A. 1983. Evolução Paleogeográfica Quaternária da Costa do Estado de Sergipe e da Costa Sul do Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Geociências**, p. 93-97.

BITTENCOURT, A. C. S. P.; OLIVEIRA M. B. de; DOMINGUEZ J. M. L. 2006. Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro – Sergipe. In: MUEHE, D. (Org.). **Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro**. 2 ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, p. 213-218.

BRIGGS, D. **Sediments**. Fakenham, Norkfolk: Fakenham Press limited, 1977. 192pp.

CAMUS, P.; MENDEZ, F. J; MEDINA, R.; TOMAS, A.; IZAGUIRRE, C. 2013 - High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas. **Coastal Engineering**, 72: 56-68. doi: 10.1016/j.coastaleng.2012.09.002.

CERC (Coastal Engineering Research Center). 1984. **Shore Protection Manual**. U.S. Army Corps of engineers, Washington, D.C., V. I, 597p.

DOMINGUEZ, J. M. L.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; MARTIN, L. 1992. Controls on Quaternary coastal evolution of the east-northeastern coast of Brazil: roles of sea-level history, trade winds and climate. **Sedimentary Geology**, 80: 213-232.

ESTEVES, L. S. 2004. Variabilidade espaço-temporal dos deslocamentos da linha de costa no Rio Grande do Sul. **Tese de Doutorado**, Programa de Pós-Graduação em Geociências, FURGS, 139pp.

FOLK, R. L.; WARD, W. C. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. **Journal of Sedimentary Petrology**, 1957, 27: 3-26.

IH CANTABRIA. 2013. **Sistema de modelado Costero, SMC. Manual del usuario, SMC**. Universidad de Cantabria y Dirección General de Costas, Ministerio de Medio Ambiente da Espanha, 166f.

KOMAR, Paul D. **The 1997-98 El Niño and Erosion on the Oregon Coast**. College of Oceanic & Atmospheric Sciences, Oregon State University Corvallis, 1998.



OLIVEIRA, M. B. 2003. Caracterização Integrada da Linha de Costa do Estado de Sergipe – Brasil. **Dissertação de Mestrado**, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 102p.

RODRIGUES, T. K. 2008. Análise das Mudanças da Linha de Costa das Principais Desembocaduras do Estado de Sergipe, com Ênfase no Rio Sergipe. **Dissertação de Mestrado**, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 80p.

SILVA, I. R.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; DIAS, J. A.; SOUZA FILHO, J. R. 2012. Qualidade recreacional e capacidade de carga das praias do litoral norte do estado da Bahia, Brasil. **Gestão Costeira Integrada**, 12(2): 131-146.

VAN RIJN, L. C., 2009. Prediction of dune erosion due to storms. **Coastal Engineering**. 56 (2009) 441–457.

Recebido em 28 de agosto de 2017
Aprovado em 25 de outubro de 2017