



MODELAGEM DE PROCESSOS SEDIMENTOLÓGICOS NA EMBOCADURA DE UM CANAL DE MARÉ PROJETADO

Rodrigo Amado Garcia Silva ¹ ; Paulo Cesar Colonna Rosman ²; Marcos Nicolás Gallo ³

RESUMO - A dinâmica de canais de maré é um assunto de relevância considerável no âmbito da Engenharia de Sedimentos, uma vez que o comportamento de uma laguna é altamente influenciado pelo que ocorre em sua ligação com o mar. Este trabalho apresenta um estudo dos processos sedimentológicos presentes na embocadura de um canal de maré por meio de modelagem computacional. O caso estudado é o de um canal, hipotético até o momento, projetado no extremo oeste Lagoa de Araruama, que está situada na Região dos Lagos, sudeste do estado do Rio de Janeiro. A abertura de tal canal seria uma alternativa para intensificar a circulação hidrodinâmica e a renovação das águas na Lagoa de Araruama, que apresenta frequentemente episódios de eutrofização. As análises apresentadas neste documento utilizaram o avaliam principalmente a influência dos processos litorâneos na evolução morfológica desse canal.

ABSTRACT - *The dynamics of tidal inlets is a relevant subject in Sediment Engineering, since the behavior of a coastal lagoon is highly affected by what happens in its maritime connection. This work presents a study on the sedimentological processes on a tidal inlet using computational modeling. The case study is a channel, hypothetical until now, projected on the west side of Araruama Lagoon, which is located on the southeast coast of the state of Rio de Janeiro. Implementing this tidal inlet would be an alternative for increasing the hydrodynamic circulation and the water renovation in this coastal lagoon, which is often eutrophicated. The analyses presented in this document evaluate mainly the influence of littoral processes on the hydro-sedimentary stability of this inlet.*

Palavras-Chave – Canais de maré, Processos litorâneos, Modelagem hidrossedimentológica.

1) Doutorando e pesquisador da Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica (Programa de Engenharia Oceânica) da COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro e Professor da Universidade Salgado de Oliveira (UNIVERSO). Email: rodrigoamado@oceanica.ufrj.br.

2) Professor Titular do Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (Escola Politécnica) e da Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica (Programa de Engenharia Oceânica - COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Email: pccrosman@ufrj.br.

3) Professor Adjunto da Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica (Programa de Engenharia Oceânica) da COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro. Email: marcosgallo@oceanica.ufrj.br.

1 - INTRODUÇÃO

Sistemas lagunares podem ser conectados ao mar por uma ou mais ligações, às quais se dá o nome de canais de maré. A estabilidade hidrossedimentológica de um canal de maré, isto é, a capacidade de sua embocadura de permanecer desobstruída, depende dos seguintes fatores: transporte litorâneo gerado na zona de arrebentação de ondas, vazões líquidas e sólidas de origem continental e magnitude das correntes de maré no canal, que podem variar em função das fases da maré e das características morfológicas do sistema lagunar (SILVA & ROSMAN, 2016).

Este trabalho apresenta um estudo sobre processos sedimentológicos na embocadura de um canal maré, considerando todos os fatores citados acima, mas com foco no efeito causado pelo transporte litorâneo. O caso estudado é o de um canal, hipotético até o momento, projetado no extremo oeste Lagoa de Araruama, que está situada na Região dos Lagos, sudeste do estado do Rio de Janeiro. Conforme verificado por GAVA (2008), a abertura de tal canal (Figura 1) seria uma alternativa para intensificar a circulação hidrodinâmica e a renovação das águas na Lagoa de Araruama, que apresenta frequentemente episódios de eutrofização. A embocadura deste canal de maré se situaria no trecho da costa conhecido como Praia Seca.

O canal de maré em questão será referido neste trabalho como Canal Oeste. SILVA (2013) e SILVA & ROSMAN (2016) estudaram as condições de estabilidade hidrossedimentológica do Canal Oeste, estimando uma área hidráulica ótima de 350 m² para sua embocadura e uma área estável mínima de 280 m²

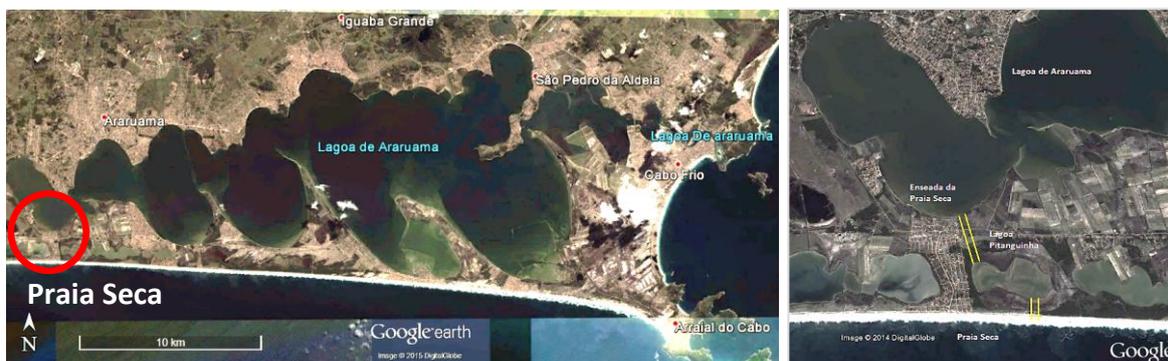


Figura 1: À esquerda, imagem da Lagoa de Araruama, indicando a localização do Canal Oeste com círculo vermelho. À direita, esquema do Canal Oeste. Fonte: Adaptado do Google Earth.

2 - OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo analisar os processos sedimentológicos que ocorreriam na embocadura do Canal Oeste, em função dos processos litorâneos presentes na Praia Seca e da dinâmica da Lagoa de Araruama. Para isto realizaram-se análises com o modelo hidrossedimentológico do SisBaHiA® - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, que considera o transporte de sedimentos ocasionado pela ação conjunta de ondas e correntes na região de



interesse. Além do transporte de sedimentos ocasionado por correntes de maré, simulou-se o transporte litorâneo gerado por ondas que se propagam desde águas profundas até o local estudado.

3 - METODOLOGIA

O SisBaHiA[®] (<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>) é um sistema de modelos computacionais destinados à análise da dinâmica ambiental de corpos d'água naturais com superfície livre. Este sistema de modelagem foi concebido e é suportado pela COPPE/UFRJ. Nesta pesquisa utilizaram-se um modelo hidrodinâmico bidimensional promediado na vertical (2DH), um modelo de transporte de sedimentos e modelos de propagação de ondas. Os três modelos rodaram acoplados, interagindo entre si. Desta forma, a circulação calculada pelo modelo hidrodinâmico é alterada por conta da propagação das ondas. As ondas influenciam não apenas as correntes, mas também a mobilização de sedimentos, por conta das velocidades orbitais criadas junto ao fundo. O modelo de propagação de ondas do SisBaHiA[®] é baseado no Ref/Dif, versão 3.0 (<https://www1.udel.edu/kirby/programs/refdif/refdif.html>). Para a modelagem do transporte de sedimentos o SisBaHiA[®] utilizou a fórmula de Van Rijn (2007), que calcula o transporte total na coluna d'água, considerando a ação conjunta de ondas e correntes. A fórmula de Van Rijn (2007) é calibrada para cálculo do transporte de sedimentos a partir da velocidade média na coluna d'água. A Lagoa de Araruama é um corpo d'água raso, onde as variações verticais de salinidade e temperatura na são pequenas, o que torna adequado o uso de um modelo 2DH.

O período simulado considerou dados ambientais do mês de janeiro de 2001, de modo a reproduzir um mês de verão, época em que a energia das ondas é mais branda e o transporte litorâneo é menos intenso. Essa situação tende a ser mais favorável à estabilidade da embocadura.

3.1 - Dados Ambientais

A Figura 2 mostra a batimetria e os limites das grades de discretização espacial utilizadas na modelagem de propagação de ondas desde águas profundas até a Praia Seca. Cada grade numérica foi utilizada para propagar ondas vindas de uma determinada direção. A batimetria em águas profundas foi obtida da base de dados do Sistema de Modelagem Costeira - Brasil (SMC Brasil - <http://smcbrasil.ihcantabria.com/>) que, dentre outras ferramentas, possui uma base de dados que combina informações das cartas náuticas brasileiras, informações das folhas de bordo de navios e dados do GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*). A modelagem de propagação de ondas foi feita a partir do clima de ondas em águas profundas, utilizando dados referentes ao ano de 2001. Estes dados foram cedidos pelo Laboratório de Instrumentação Oceanográfica (LIOC) da COPPE/UFRJ. Os dados horários de altura significativa, período de pico e direção de pico do espectro de ondas foram obtidos através da reanálise do estado de agitação

marinha com o modelo numérico WAVEWATCH III. A série temporal de ondas foi obtida no ponto de coordenadas UTM (770532; 7393546), onde a profundidade é de 151 m (Figura 2).

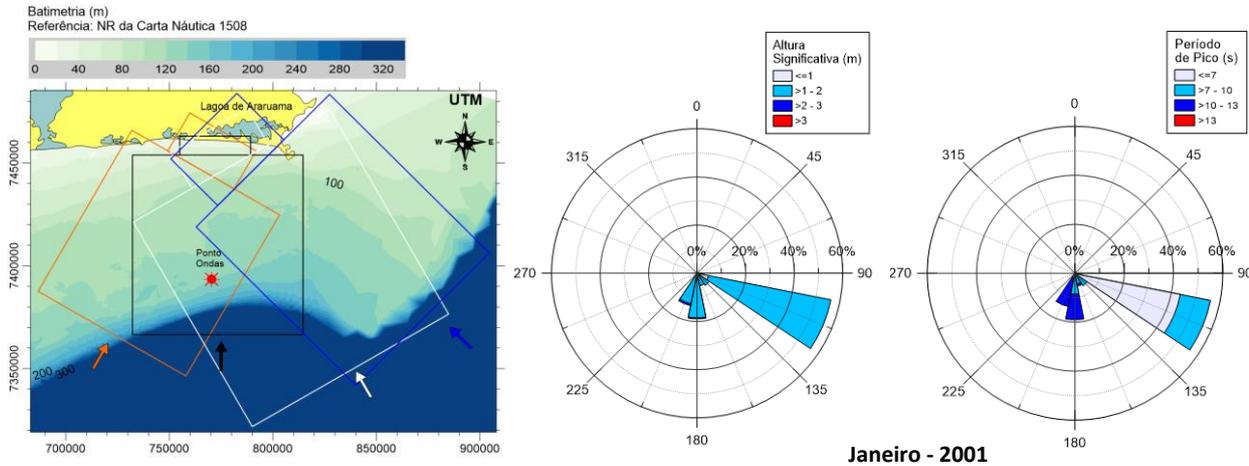


Figura 2: À esquerda, batimetria da região de águas profundas modelada, e do ponto onde foi obtida a série temporal de ondas. À direita, clima de ondas considerado na modelagem. Fonte: autoria própria.

A Figura 3 apresenta a batimetria do domínio de modelagem. A batimetria no interior da Lagoa de Araruama é baseada em uma compilação de dados medidos pela Universidade Federal Fluminense – UFF, em 2005, e pela Superintendência Estadual de Rios e Lagoas – SERLA, em 2006 e 2009. Os dados batimétricos da região marítima foram obtidos da carta náutica 1508. A batimetria da Praia Seca é baseada em medições de Muehe (1979), que mediu perfis de praia em diferentes pontos ao longo do litoral entre os municípios do Rio de Janeiro e de Cabo Frio.

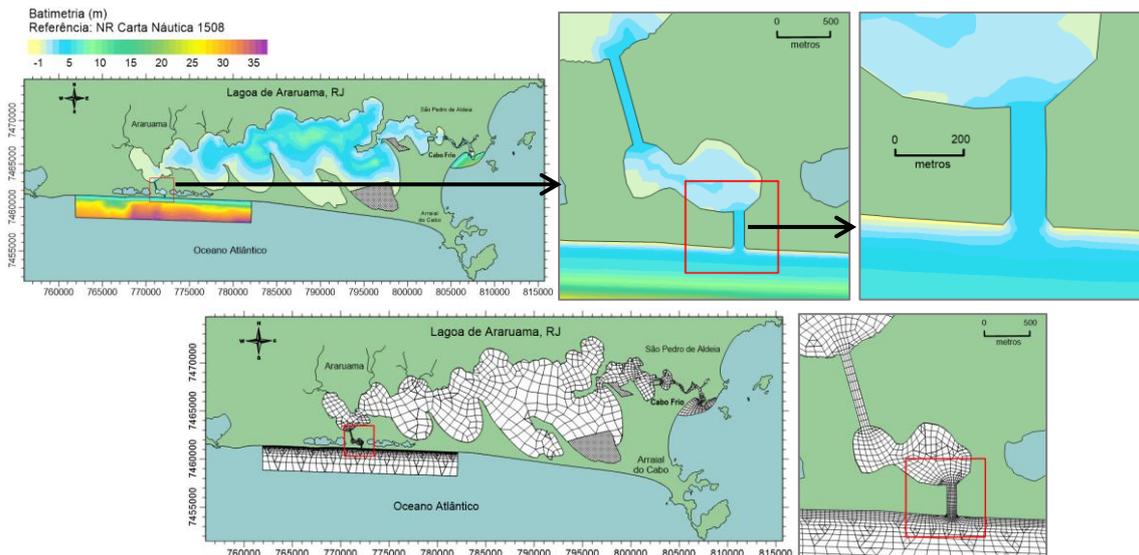


Figura 3: Batimetria e discretização espacial da região modelada. Fonte: autoria própria.

Muehe (1979) observou que a faixa de litoral onde se situa a Praia Seca apresenta predominantemente areia média e areia grossa entre a linha de costa e a profundidade de fechamento, com D_{50} variando entre 0,40 mm e 0,60 mm. O fundo da Lagoa de Araruama apresenta predominantemente areia finas e muito finas, com algumas porções de sedimento mais

fino. De acordo com medições feitas em 1984 pela Companhia de Pesquisa de Recurso Mineral (CPRM), disponíveis em Bidegain & Bizerril (2002). A Figura 4 mostra o percentual de ocorrência de diferentes classes de sedimentos na região de maior interesse: o Canal Oeste e a Praia Seca. Nesta modelagem assumiu-se que as classes de sedimentos presentes no Canal Oeste seriam as mesmas que estão presentes na Praia Seca.

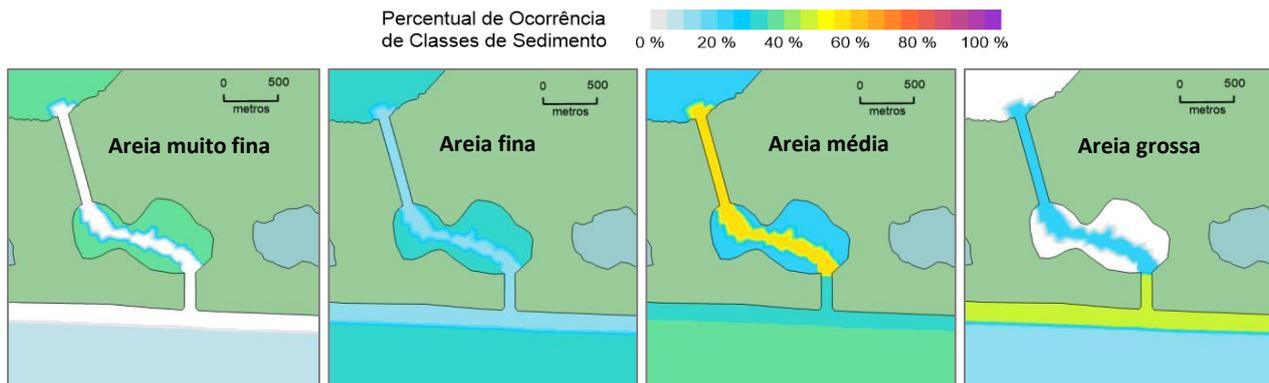


Figura 4: Distribuição de sedimentos no Canal Oeste e na Praia Seca. Fonte: autoria própria.

4 - RESULTADOS

A Figura 5 mostra correntes de maré enchente e vazante, respectivamente, em instantes de preamar e baixa-mar de sizígia. As correntes de maré apresentam magnitude de até 1,4 m/s. Nos instantes observados à esquerda na Figura 5, aproximam-se da costa ondas vindas de sudeste, que apresentam menor energia e são características de bom tempo. Essas ondas geram corrente litorânea com magnitude menor que 0,2 m/s. Nos instantes indicados à direita, aproximam-se da costa ondas vindas de sul e sudoeste, que apresentam maior energia e são características de mau tempo. Essas ondas geram corrente litorânea mais intensas, com magnitude em torno de 1,0 m/s.

A Figura 6 mostra as variações de batimetria ocorridas após 37 dias do início da simulação. Valores positivos indicam erosão, enquanto valores negativos indicam assoreamento. Ao largo da zona de arrebentação e no interior da Lagoa de Araruama não houve alteração significativa da batimetria. Na embocadura do Canal Oeste houve assoreamento de até 2,8 m no ponto B. No trecho de praia junto à margem leste do canal, local onde ocorrem correntes de até 2,2 m/s, cf. Figura 5, houve erosão de até 4,7 m. A simulação foi encerrada ao final do 37º dia, pois o canal atingiu uma situação que SILVA & ROSMAN (2016) consideraram como instável.

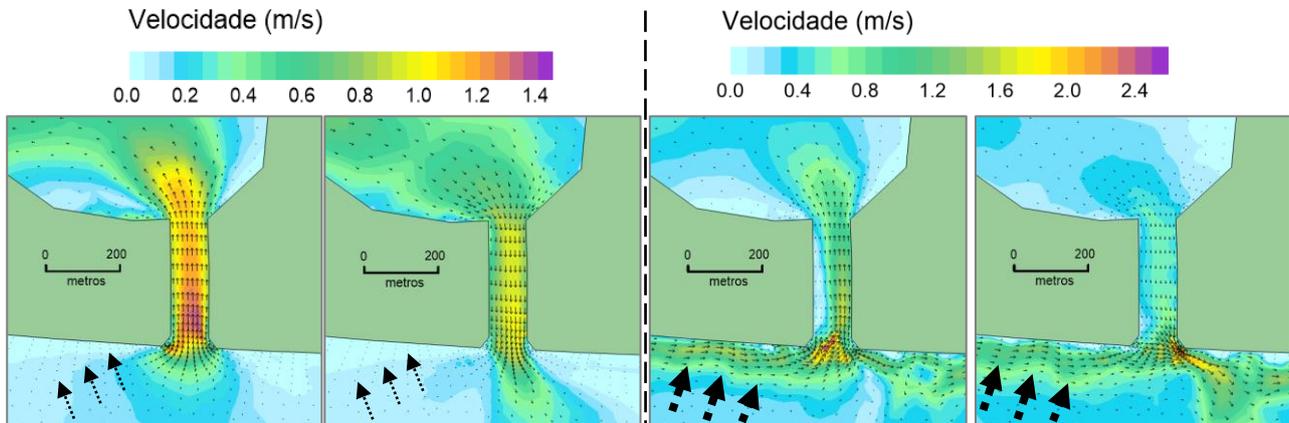


Figura 5: Magnitude de correntes de maré enchente e vazante durante situações de preamar e baixa-mar de sizígia, respectivamente. À esquerda, instante em que chegam à costa ondas de bom tempo. À esquerda, instante em que chegam à costa ondas de mau tempo.

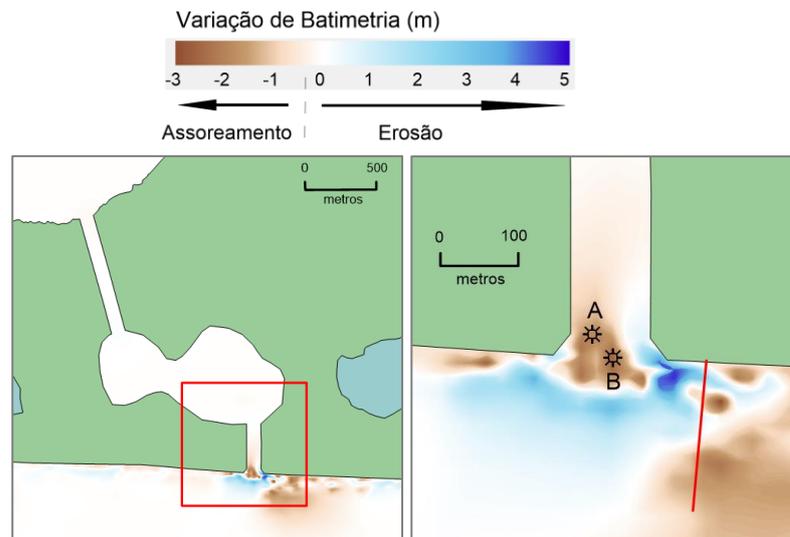


Figura 6: Variação de batimetria após 37 dias de simulação, num período representativo do mês de janeiro e início de fevereiro.

A Figura 7 (à esquerda) mostra as variações temporais de batimetria nos pontos A e B (Figura 6), assim como a evolução no tempo do transporte litorâneo (Q_l) calculado ao longo da seção transversal mostrada em vermelho na Figura 6. Percebe-se que ao longo da simulação ocorrem três ciclos de assoreamento e recomposição da batimetria original. O assoreamento está correlacionado com o aumento do transporte litorâneo, situação na qual um maior volume de sedimentos é transportado para a o interior da embocadura. À medida que o transporte litorâneo de frente à embocadura diminui, a batimetria tende a retornar para a situação original. Valores negativos indicam transporte litorâneo para leste, enquanto valores positivos indicam transporte para oeste.

A Figura 7 (à direita) mostra ainda como variam no tempo a direção (em azimutes) e a altura das ondas em águas profundas. Nota-se que os episódios de assoreamento ocorrem nos períodos

em que incidem na praia ondas vindas de sul e sudoeste (azimute maior que 180°), típicas de mau tempo e que carregam consigo mais energia. Após a passagem das frentes frias, a condição de bom tempo retorna, com ondas tipicamente de sudeste (azimute menor que 150°), que têm alturas menores e menor capacidade de transportar sedimento para a embocadura. A condição de bom tempo permite que as correntes de maré transportem para fora do canal o sedimento depositado, fazendo com que a batimetria tenda a retornar à situação original.

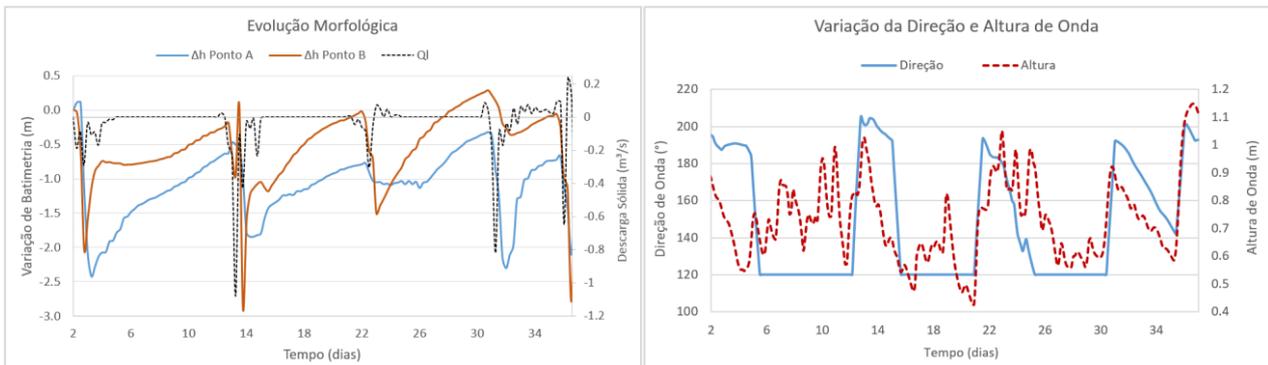


Figura 7: Evolução morfológica nos pontos A e B. Valores negativos indicam assoreamento, enquanto valores positivos indicam erosão.

A Figura 8 mostra a batimetria na embocadura do Canal Oeste no instante inicial e após 37 dias. Nota-se que houve obstrução da entrada do canal. A seção transversal original teve sua área reduzida de 350 m^2 para 270 m^2 . Segundo SILVA & ROSMAN (2016), o Canal Oeste precisaria ter seção transversal com pelo menos 280 m^2 para ter chance de ser estável.

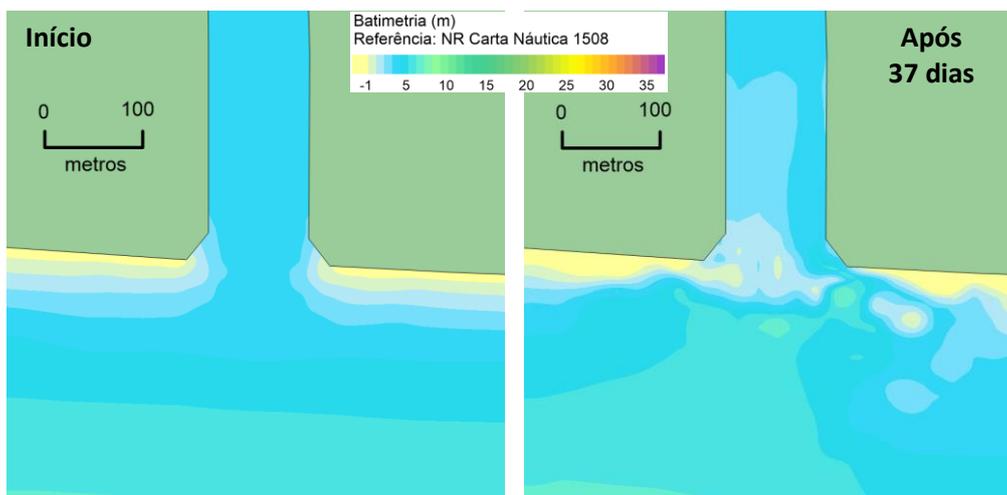


Figura 8: Variação no tempo da direção das ondas em águas profundas.

5 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma modelagem dos processos hidrossedimentológicos presentes na embocadura do Canal Oeste. Durante o período simulado o canal de maré passou ciclicamente por episódios de assoreamento, seguidos de mobilização do sedimento e recomposição da



batimetria original. Os resultados revelaram que a morfologia do canal seria fortemente impactada pela ocorrência de ondas de tempestade, carreariam de sedimentos para a embocadura. Após o retorno das condições de bom tempo, o sedimento depositado seria removido pelas correntes de maré, fazendo com que a batimetria tendesse à situação original. Este resultado é condizente com os resultados de SILVA & ROSMAN (2016), que mostraram que, em um cenário em que o transporte litorâneo é pequeno, as correntes de maré no Canal Oeste seriam capazes de manter sua embocadura desobstruída.

Apesar de ter sido considerado o cenário com clima de ondas mais brando ao longo do ano, ao fim do período de simulação a área hidráulica da embocadura chegou a um valor que caracterizaria situação de instabilidade, de acordo com SILVA (2013) e SILVA & ROSMAN (2016). É possível que, em um cenário com clima de ondas de inverno, o assoreamento fosse maior e a embocadura entrasse de forma irreversível na situação de instabilidade. Nas etapas futuras desta pesquisa pretende-se modelar a situação de inverno, assim como quantificar e relacionar as taxas de transporte litorâneo na Praia Seca com o prisma de maré que adentraria o Canal Oeste, de modo a se investigar mais a fundo sua tendência a estabilidade ou instabilidade.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIDEGAIN, P., BIZERRIL, C. **Lagoa de Araruama: Perfil Ambiental do Maior Ecossistema Lagunar Hipersalino do Mundo**, Rio de Janeiro, RJ: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2002.

GAVA, G.L. Avaliação de Renovação de Águas na Lagoa de Araruama – RJ, via Abertura de Canal com o Mar no Extremo Oeste. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

MUEHE, D. “Sedimentology and Topography of a High Energy Coastal Environment Between Rio de Janeiro e Cabo Frio – Brazil”, **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 51, n. 1, pp. 473 – 481, 1979.

SILVA, R. A. G. **Análise da Viabilidade Hidro-Sedimentológica de um Canal de Maré Projetado no Oeste da Lagoa de Araruama – RJ**. Projeto de Graduação, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.

SILVA, R. A. G.; ROSMAN, P. C. C. “Viabilidade Hidro-Sedimentológica de um Canal de Maré Projetado no Oeste da Lagoa de Araruama -RJ”, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 25 -35, 2016.

VAN RIJN, L.C., “Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. II: Suspended Transport”, **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 133, n. 6, pp 668 – 689, 2007.