

Uma Análise na Dragagem do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú/Manguaba em Alagoas através de um Modelo Numérico Hidrodinâmico Bidimensional – Resultados Preliminares

Roberaldo Carvalho de Souza, Rosângela Sampaio Reis

Centro de Tecnologia – CTEC, Universidade Federal de Alagoas – UFAL

rsonza@ctec.ufal.br e rsr@ctec.ufal.br

Carlos Ruberto Fragoso Júnior, Christopher Freire Souza

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH

erfjunior@zippymail.com.br e cfsouza@ppgiph.ufrgs.br

Recebido: 22/10/03 revisado: 11/03/04 aceito: 20/12/04

RESUMO

O presente trabalho faz parte dos estudos inseridos no plano de ações e gestão integrada para o Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú/ Manguaba (CELM), localizado a sudeste da cidade de Maceió no Estado de Alagoas, imprescindível para o desenvolvimento de um programa estratégico de intervenção na região de abrangência do CELMM, com a definição de medidas estruturais e não-estruturais e do arranjo institucional necessário para que as ações possam ser efetivamente implementadas. Este trabalho tem o objetivo de analisar uma proposta de dragagem através da simulação de um modelo numérico hidrodinâmico bidimensional. A realização desta obra de engenharia tem o intuito de possibilitar uma troca maior de água entre o continente e o oceano, resolvendo parcialmente o problema de hidrodinâmica, possibilitando certa limpeza do estuário. Como resultados preliminares desta implementação podemos ressaltar o aumento do prisma de marés, bem como, do fluxo de massa.

Palavras-chave: *dragagem; modelo; hidrodinâmica.*

INTRODUÇÃO

O Estado de Alagoas, localizado na região centro-oriental do nordeste brasileiro, possui uma costa de aproximadamente 230 quilômetros que corresponde a uma faixa de grande complexidade e dinamismo, conforme descrito no “Guia do Meio Ambiente” (3a. edição revisada/1995 - Projeto IMA/GTZ de cooperação técnica). Ao longo do litoral alagoano pode-se encontrar 17 lagoas, em média uma a cada 14 quilômetros, surgindo daí o nome do Estado. As lagoas apresentam as mais diversas características, dependendo da ligação com o oceano que ocorre ora diretamente, ora através de canais. Devido à complexidade da dinâmica entre a água doce e a salgada, podem acontecer variações na salinidade, contribuindo sobremaneira na diversidade e distribuição da fauna e flora do ambiente. Os estuários têm uma importância histórica e contínua para o desenvolvimento de todas as atividades do homem. Esta afirmação é confirmada quantitativamente pelo fato de dois terços das grandes cidades distribuídas em todo mundo estarem localizadas em estuários ou em sua vizinhança imediata (Souza e Kjerve, 1997). Tal como ocorre em outros países, a adequação para instalação de portos, riqueza e diversidade biológica, aliados à capacidade de renovação sistemática e periódica de suas águas, constituem atrativos

para o estabelecimento e desenvolvimento das principais cidades brasileiras em suas proximidades, como no caso da cidade e porto de Maceió que se situa às margens das Lagoas Mundaú e Manguaba. A capacidade de diluição, renovação e autodepuração das águas de um estuário, bem como de qualquer corpo aquático, não é infinita e depende de uma série de processos de natureza física, biológica, química e geológica, os quais interagem entre si de uma forma extremamente complexa (Davis, 1996). Assim, após décadas de total falta de controle e de uso abusivo, em que serviram silenciosamente de receptáculo para despejos de esgotos domésticos, resíduos industriais, pesticidas e fertilizantes entre outros poluentes, as águas das praias, os estuários e as restingas estão devolvendo na mesma intensidade, na forma de peixes mortos, blooms de algas e doenças, todo o lixo que receberam e tentaram metabolizar ao longo dos anos. Para evitar a degradação desses corpos d’água é de fundamental importância que toda a interferência externa seja cuidadosamente planejada, simulada e monitorada continuamente. Para o Estado de Alagoas, onde não existem estudos de gerenciamento de zonas litorâneas e ecossistemas lagunares interiores, o trabalho proposto será certamente de grande utilidade.



Figura 1 - Imagem do satélite TM LANDSAT 5 (1995) com a localização do CELMM (cedida pela COHIDRO – Consultoria, Estudos e Projetos Ltda).

Localizado nos tabuleiros costeiros de Alagoas, entre as latitudes 9°35'S e 9°47'S e longitudes 35°44'W e 35°58'W, o Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú /Manguaba (CELMM) é um dos complexos lagunares mais belos e produtivos do Brasil (Figura 1).

As Lagoas de Mundaú e Manguaba, localizadas a sudeste da cidade de Maceió, compõem um ecossistema lagunar onde se processa a dinâmica de escoamento das águas das bacias hidrográficas dos rios Mundaú e Paraíba, respectivamente, e o fluxo e refluxo das marés. As lagoas se interligam em sua porção inferior através de canais, apresentando uma única comunicação com o mar, e possuem áreas de 27 quilômetros quadrados (Mundaú) e 42 quilômetros quadrados (Manguaba). Estima-se que 4 mil famílias de pescadores obtêm destas lagoas o seu sustento e que, completando-se as ligações indiretas representadas pelo setor de serviço, cerca de 100 mil pessoas vivem na dependência desse ambiente, segundo informações obtidas durante o Levantamento Ecológico Cultural da Região das Lagoas Mundaú e Manguaba, SEPLAN/AL (1980). Por sua extensão e pela riqueza de suas águas, o CELMM constitui um sistema de expressivo potencial econômico e passível de ser aproveitado, sem prejuízos para o ambiente,

desde que o gerenciamento de suas águas seja adequadamente promovido.

Uma série de alterações vem ocorrendo ao longo dos últimos anos na área das Lagoas Mundaú e Manguaba, que têm afetado seu equilíbrio ecológico, gerando sérios distúrbios sociais, na medida em que têm afetado a base de sustentação de grande contingente populacional. Dentre os problemas ambientais constatados no CELMM, tem-se:

- a redução da produção de pescado, inclusive com o desaparecimento de certas espécies de peixes;
- o assoreamento da embocadura das lagoas, alterando a circulação de suas águas;
- o desencadeamento de processos de eutrofização das lagoas pelo carreamento de grandes quantidades de nutrientes para o ecossistema;
- a contaminação por diversos resíduos químicos.

O CELMM enfrenta, ainda, os efeitos decorrentes da operação da atual BRASKEN antigo Pólo Cloroquímico de Alagoas, localizado às suas margens; das pres-

sões pela urbanização da orla lagunar e da ocupação e uso do solo; da ampliação do sistema viário e de transportes; e os resultantes da intensa exploração turística desse patrimônio histórico, cultural e paisagístico.

As lagoas Mundaú e Manguaba foram constituídas pelo barramento da foz dos rios Mundaú e Paraíba, por deposição dos sedimentos marinhos e o consequente afogamento de seus leitos. A lagoa Mundaú constitui o baixo curso da bacia hidrográfica do rio Mundaú, que drena uma área de 4.126 quilômetros quadrados e percorre 30 municípios, dos quais 08 (oito) apresentam sedes municipais ribeirinhas. A lagoa Manguaba constitui a região estuarina dos rios Paraíba do Meio e Sumaúma. O primeiro apresenta uma bacia hidrográfica de 3.330 quilômetros quadrados e percorre 20 municípios, dos quais 13 (treze) apresentam sedes municipais ribeirinhas, enquanto que o Sumaúma drena uma área 406 quilômetros quadrados e percorre 06 municípios, contando com 01 sede municipal ribeirinha. As águas destas lagoas se encontram numa zona de canais com 12 quilômetros quadrados, perfazendo um total de 81 quilômetros quadrados. As bacias dos rios Mundaú e Paraíba têm seu alto curso na região do agreste do Estado de Pernambuco.

O presente documento apresenta uma proposta de dragagem através da simulação de um modelo numérico hidrodinâmico bidimensional, estudo este imprescindível para a execução de um plano de ações e gestão integrada para o Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú/Manguaba.

DRAGAGEM

O homem, através de suas atividades, promove alterações nos rios e estuários, modificando a qualidade da água e sua geometria, e.g., dragagem, aterros, retificação das margens, e/ou à qualidade da água. Neste trabalho, a especial ênfase será dada à modificação da geometria do estuário através da dragagem e sua influência na circulação hidrodinâmica.

O princípio de gerenciamento de estuários inicialmente foi o de facilitar a penetração da maré o mais longe possível para montante, a fim de favorecer a navegação (Coutinho, 1986). Partindo da necessidade de prover condições para navegabilidade, notou-se a necessidade da utilização de dragas, para escavação ou remoção de solo ou rochas, objetivando-se aprofundar e alargar canais em rios, portos e baías, bem como na construção de diques e preparação de fundações para pontes e outras estruturas (Compton's Encyclopedia, 1998 *apud* Torres, 2000). Ainda nos dias atuais, a navegabilidade dos canais continua sendo alvo de estudos, conforme pode ser visto em Schettini (2001) e Camargo Júnior (2000).

Dentre os tipos de dragagem mais utilizados, destacam-se as hidráulicas e as mecânicas. A Figura 2 mostra um esquema para as dragas hidráulicas, as quais normalmente atuam em projetos de manutenção, removendo e transportando material, através de dutos, em estado líquido. As dragas mecânicas, Figura 3, atuam em projetos tanto de manutenção como em dragagens iniciais, removendo sedimentos de fundo através da aplicação direta de força mecânica, levando-as em seguida a barcos para o transporte até o seu local de deposição. A escolha do equipamento e método a ser aplicado depende dos seguintes fatores:

- características físicas do material a ser dragado;
- quantidade a ser dragada;
- profundidade;
- distância ao local de deposição do material dragado;
- ambiente físico de dragagem e da área de deposição;
- nível de contaminação dos sedimentos;
- método de deposição;
- produção requerida;
- custo.

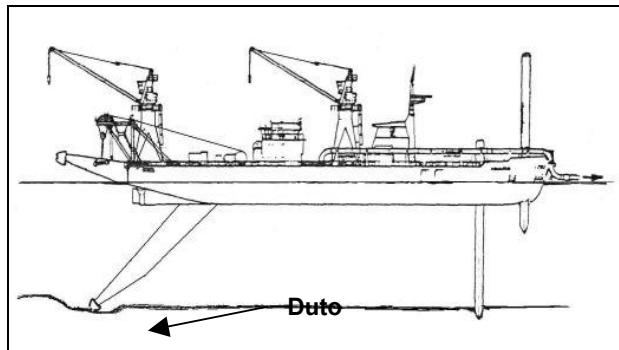


Figura 2 - Esquema de uma draga hidráulica.

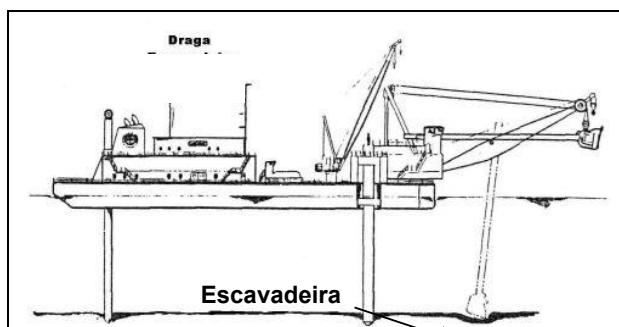


Figura 3 - Esquema de uma draga mecânica.

A seleção devida do tipo de dragagem, do equipamento de transporte e do método a ser utilizado deve ser compatível com o local de deposição. As alternativas possíveis tratam da deposição em água (rios, lagos, estuários ou oceanos), em área confinada ou uso benéfico deste material. A escolha própria do local deve ser baseada na viabilidade ambiental, técnica e econômica, como relatado por Oliveira (1997), Borma (1998) e Santos (2001). Para o caso em estudo, de acordo com os trabalhos realizados por Souza (1998) e Oliveira (1997), a dragagem mecânica é a solução mais adequada, onde um dos parâmetros utilizado foi fundamentado na escolha do local de deposição do material dragado o qual deve se localizar em coqueirais afastado dos mangues e relativamente próximo das regiões a serem dragadas.

O potencial para impactos ambientais da deposição em água é decorrente do comportamento físico da descarga do material, sendo influenciado pelo tipo de dragagem, execução na operação de deposição utilizada, natureza do material e da hidrodinâmica do local de deposição. A análise da interferência da dragagem quanto à qualidade da água tem sido efetuada, conforme Santos (2001), Almeida (1999) e Camargo Júnior (2000) que parte da criação de um Sistema de Informações.

As considerações a serem atendidas na construção de locais confinados para deposição de material dragado, como diques, fazem referência à capacidade de armazenamento adequado, acordando com os requerimentos, a maximizar a eficiência na retenção dos sólidos e ao controle dos contaminantes. Deve-se salientar a presença de grandes quantidades de água, a depender do tipo de dragagem utilizado, tornando possível a sua evaporação ou retorno ao ambiente (exceto na presença de contaminantes), por infiltração ou escoamento.

O uso benéfico do material dragado deveria ser incorporado às metas e planos dos projetos, dada as vantagens que esta pode trazer tanto no sentido ambiental como financeiro. É conhecida uma ampla variedade de opções, sendo aqui relacionados alguns usos benéficos, baseados no uso funcional:

- restauração e/ou melhoria do *habitat*;
- contenção de erosões e estabilização da costa;
- utilização em áreas confinadas para piscicultura;
- utilização em áreas confinadas para parques e áreas de recreação;
- utilização em áreas confinadas para agricultura, horticultura e florestamento;
- cobertura para solos estragados e minas abandonadas (acidez) (Kjerfve, 1992).

Em muitos casos, o material dragado é lançado em local onde o material com aquela textura não se acumularia naturalmente ou, no mínimo, não tão rapidamente. Outras vezes é jogado no próprio canal do estuário onde poderá permanecer, especialmente se for lançado ao abrigo de fortes correntes. Outro ponto de observação importante é a construção de diques em áreas de preservação ambiental, como os mangues, o que deve ser evitado.

O aprofundamento dos canais facilita a penetração das marés no estuário, ocasionando, além das vantagens já apresentadas, possibilidade de uma maior renovação das águas a cada ciclo de maré e troca da água interior poluída por água oceânica com maior salinidade e melhor qualidade, podendo também ser verificada uma maior navegabilidade a depender da profundidade obtida. Estudos, relacionados a esse tópico, vêm sendo realizados na área de qualidade dos sedimentos, conforme os trabalhos de Borma (1998) e o de Almeida (1999), bem como quanto ao seu carreamento (hidrodinâmica), como visto em Santos (1998), Barbosa (2001) e Schettini (2001). A diferença de comportamento entre os vários tipos de estuários está relacionada a geometria e aos diferentes graus de mistura da água doce proveniente do continente com a água salgada no estuário, tendo como resultado diferentes tipos de circulação estuarina. A dragagem poderá alterar a concentração de material em suspensão, podendo ter efeitos importantes sobre a estética, qualidade da água e a biota, resultando na diminuição da produção de oxigênio pelo fitoplâncton, uma vez que o aumento de suspensóides diminui a profundidade da zona eufótica. Outra desvantagem da dragagem é a necessidade de manutenção periódica, tendo em vista o ressurgimento do assoreamento, que ocorre no local de maior fonte de sedimentos finos, ou na zona de turbidez máxima (Döbereiner, 1983 *apud* Coutinho, 1986).

Em resumo, a dragagem nos canais do CELMM torna possível a entrada de água oceânica, acarretando melhor qualidade da água, além de melhorar a navegabilidade, conforme os trabalhos de Oliveira (1997) e Souza (1998). O assoreamento causa a formação de bancos de areia os quais dificultam a navegação e impedem a entrada de salinidade, diminuindo a quantidade de peixes e mariscos, além de agravar o problema de poluição na estação das chuvas, como defende Oliveira (1997). O processo de dragagem na Boca da Barra foi iniciado em 2 de outubro de 2002, contando com a parceria de diversas empresas privadas do Estado. Durante este projeto foram desenvolvidas ainda, atividades de educação ambiental em parceria com as prefeituras e ONGs, e reflorestamento de matas ciliares em parceria com as usinas de cana de açúcar (Cabral, 2002). No entanto, atividades de monitoramento devem seguir em paralelo às atividades em execução, bem como o acompanhamento e comparação dos resultados obtidos pelo modelo de simulação da circulação de águas, caso este tenha sido analisado previamente à dragagem.

METODOLOGIA

Modelo hidrodinâmico bidimensional

O modelo numérico usado neste trabalho foi desenvolvido por Souza *et al* (2003), baseado nas equações da quantidade de movimento e da continuidade, geralmente conhecidas como equações de águas rasas. As equações de águas rasas descrevem um escoamento bidimensional, integrado verticalmente (valores médios) e irregular. As equações assumem que o fluido é incompressível e que a distribuição de pressão é hidrostática. Outras hipóteses admitidas, que são razoáveis para o estudo, foram que: (a) não há estratificação de densidade; (b) não há variação da tensão de cisalhamento na direção horizontal; (c) os termos convectivos não lineares são pequenos comparados com a aceleração local; (d) os termos de mistura horizontal (viscosidade horizontal) são desprezíveis; (e) a velocidade vertical é pequena em relação à velocidade horizontal. Escrita em forma diferencial as equações governantes para o escoamento bidimensional têm a forma:

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{1}{Q} \tau_{zxs} - f \frac{q_x |q|}{8\bar{D}^2} - \beta q_y \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{1}{Q} \tau_{zys} - f \frac{q_y |q|}{8\bar{D}^2} + \beta q_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = q_0 \quad (3)$$

onde t é o tempo; q_x e q_y são as componentes da vazão por unidade de largura nas direções x e y respectivamente; η é a elevação da superfície da água medida a partir de um nível de referência (Figura 4); h é a profundidade medida a partir do mesmo nível de referência; $D = h + \eta$, é a profundidade total; $|q| = \sqrt{q_x^2 + q_y^2}$ é o módulo da vazão por unidade de largura; \bar{D} é a profundidade média total; g é a aceleração da gravidade; Q é a densidade da água; τ_{zxs} e τ_{zys} são as tensões de cisalhamento na superfície nas direções x e y ; f é o coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach, β é o parâmetro de Coriolis e q_0 representa as fontes e sumidouros no sistema.

O esquema numérico de discretização adotado no modelo é o de diferenças finitas com tratamento explícito em todos os termos. Esta consideração facilita a montagem do algoritmo, mas tem problemas na garantia da estabilidade sendo necessário utilizar intervalos de tempo menores do que os utilizados em outros esquemas, como por exemplo o esquema semi-implícito de direções alternadas, denominado ADI (*Alternative Direction Implicit*) (Benqué *et al*, 1982), e o esquema Euleriano-Lagrangiano apresentado por Casulli (1990).

Na resolução do sistema de equações diferenciais parciais, além da necessidade de recorrer a métodos numéricos, é necessário formalizar as condições iniciais e de contorno do sistema. Normalmente, uma vez que é difícil obter medidas ao longo do sistema que venha a caracterizar um estágio de circulação, as condições iniciais são arbitrárias e, usualmente, são consideradas as velocidades u e v nulas e a superfície de elevação da água inicial (η_0) prescrita pelo modelador, ao longo do sistema. Esta consideração leva a um resultado falso nas primeiras iterações, mas tende ao resultado real à medida que as iterações se sucedem, geralmente em um período de simulação correspondente a um ciclo de maré (Souza *et al*, 2003), fato que pode consumir muito tempo computacional em alguns casos, dependendo da definição da discretização espacial e temporal.

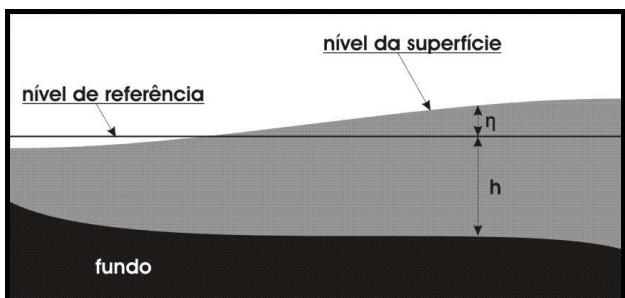


Figura 4 - Esquema dos elementos integrantes das equações de movimento, baseado em Collischonn e Marques (2003).

As condições de contorno serão estabelecidas de maneira a melhor se aproximar das condições reais. Ao longo da costa, que forma o contorno terra-água do sistema, a condição usada no contorno será a de fluxo nulo, a componente da velocidade normal ao contorno é nula. Analogamente, esta condição será também aplicada às fronteiras internas do sistema, e.g., nas ilhas. Se o sistema está sujeito a uma variação de nível (e.g. maré), então a variação de nível deve ser imposta ao longo de uma linha ou região, como no contato entre um rio e o oceano. A intensidade e direção do vento também devem ser impostas pelo modelador ao longo do sistema. Nos trechos de fronteiras do sistema representando entrada ou saída de rios ou canais, além da prescrição da velocidade ser diferente de zero ao trecho de fronteira em questão, há também que se prescrever a componente tangencial, usualmente zero, de acordo com Rosman (1999).

Nem sempre a estrutura computacional de um modelo numérico é de fácil manuseio, principalmente quando o usuário não estiver familiarizado com o ambiente de trabalho no qual o modelo foi desenvolvido. Para mi-

nimizar este tipo de problema é comum a criação de uma linguagem orientada ao objeto com o intuito de conduzir o modelador a uma resposta eficiente e prática. Neste intuito um modelo computacional foi desenvolvido em ambiente MATLAB for Windows o qual permite um maior manuseio nos processos de montagem, definição dos parâmetros de entrada, armazenamento, processamento, calibração do modelo e pós-processamento.

Esta versão inicial, com distribuição livre para fins não comerciais, fornece recursos para a modelagem de escoamentos de corpos d'água rasos em duas dimensões, onde se podem enquadrar rios, canais, lagos, lagoas, estuários e baías. Trata-se de um sistema integrado, de modo a simplificar o processo de modelagem, apresentando ferramentas facilitadoras para montagem, preparação e entrada de dados fundamentais que o modelo computacional necessita, onde se destacam:

- gerador de malhas uniformes de discretização do domínio de interesse;
- algoritmo para interpolação de dados de vazão, maré e vento para qualquer instante inserido no período de simulação;
- visualizador gráfico do fluxo das águas do corpo aquático, bem como saídas gráficas e numéricas de corrente e maré ao longo do tempo, para análise de consistência.

Alguns dados de entrada são fundamentais para que o modelo possa iniciar o processo de cálculo das equações diferenciais parciais discretizadas no espaço e no tempo. Esses são introduzidos a partir de uma única tela que, ao mesmo tempo, permite ao modelador armazenar estas informações em um banco de dados. Dentre esses parâmetros, podem ser citados o fator de atrito (parâmetro de calibração), o coeficiente de Coriolis, o nível inicial da maré, o tamanho da malha, o intervalo total para simulação, o incremento de tempo, a matriz base do estuário, a matriz batimetria, as matrizes de intensidade e direção do vento e as matrizes de definição da maré e vazão no contorno.

Identificação das Áreas Críticas

A amplitude média das marés oceânicas fica reduzida a 36% quando entra nos canais, decaindo para 14% dentro da lagoa Mundaú e para 2% dentro da lagoa Manguaba (Oliveira e Kjerfve, 1993). Isto demonstra claramente que os canais de ligação possuem baixa eficiência na comunicação entre o oceano e as lagoas. Os canais não são uniformes, possuindo áreas com maior estrangulamento, onde a energia das marés é gradativamente dissipada.

Para localização das áreas críticas de estrangulamento à passagem de fluxo d'água, foram identificados os pontos com maior perda de energia das correntes, ou seja, de maior velocidade, uma vez que a perda de energia por atrito no fundo é proporcional ao quadrado da velocidade. Um segundo critério, derivado deste primeiro, é o de que as maiores velocidades têm maior capacidade de transportar sedimentos de fundo, ficando apenas os grãos mais pesados, de maneira que os leitos com maior concentração de sedimentos grossos caracterizam áreas de velocidades mais intensas. De acordo com a análise do fluxo hidrodinâmico, levantamentos topográficos do fundo estuarino (Pasenau, 1998) e perfis batimétricos adicionais, foram identificadas quatro áreas críticas de estrangulamento ao fluxo nos canais de comunicação entre o oceano à lagoa Manguaba. As áreas críticas são:

- o esporão ao sul da Boca da Barra, conforme Figura 5, com duas regiões e profundidades de dragagens distintas: uma de 26 mil m² e volume de dragagem de 52 mil m³ na região com a cota de dragagem de 0,00 (DHN) e outra área de 51 mil m² com volume de 280 mil m³ na região com a cota de dragagem -3,00 m (DHN);
- os bancos rasos da região da Prainha (Figura 5) com uma área de 105 mil m² e volume de 190 mil m³ com cota de dragagem -2,00 m (DHN);
- o banco da Massagueira, próximo à junção dos canais (Figura 6) com área de 50 mil m² e volume de 97 mil m³ com cota -2,00 m (DHN);
- o Canal Novo na entrada da lagoa Manguaba (Figura 7) com área de 55 mil m² e volume de 220 mil m³ com cota -3,50 m (DHN), totalizando uma área de dragagem correspondente a 287 mil m² e um volume de 839 mil m³. Estas áreas foram estudadas e, em seguida, foi projetada a dragagem de canais de forma a manter uma área global da seção transversal ao fluxo, superior a 300 m².

A cota padrão do fundo dos canais a serem dragados foi calculada em -2,00 m em relação ao zero das cartas náuticas (DHN), por ser esta uma profundidade típica do canal natural nos locais com correntes moderadas e sem estrangulamento. Adotou-se, para todas as seções analisadas, o valor de 100 m de largura de canal por esta proporcionar uma área de seção transversal viável, mesmo durante as marés baixas. Esta regra não se aplicou ao Canal Novo na entrada da lagoa Manguaba (Figura 7), uma vez que se trata de um canal muito estreito, com margens parcialmente cobertas com vegetação de mangues (a ampliação necessária de sua área da seção transversal ao fluxo, com esta cota, implicaria em um alargamento). A dragagem do

esporão (Figura 5) da margem direita da barra também necessita de uma cota mais profunda para o leito, para que acorde com os níveis das marés mínimas nesta região. O restante do esporão entre o novo canal a ser dragado e o canal atual, indicado na Figura 5, deverá ser removido até a cota das marés mínimas (0,00 m do DHN), de maneira que o mesmo fique sempre submerso, contribuindo também para o maior fluxo d'água durante as marés altas (Oliveira, 2000).

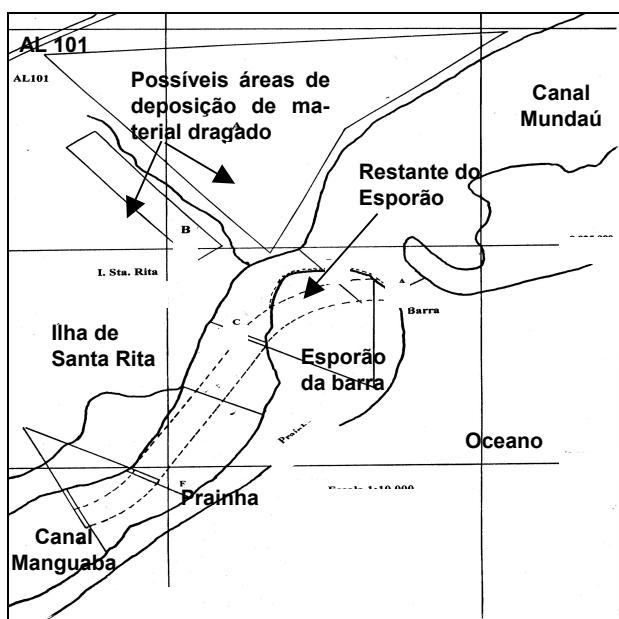


Figura 5 - Croquis da Boca da Barra, com as linhas pontilhadas indicando o canal a ser dragado (OLIVEIRA, 2000).

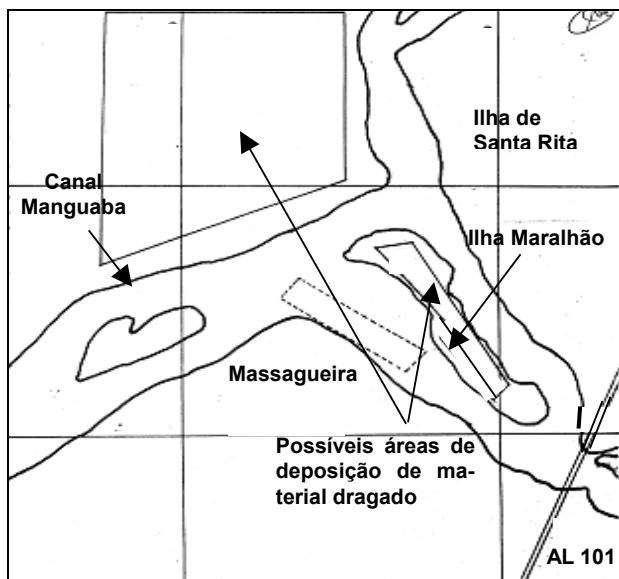


Figura 6 - Croquis da Massagueira, com as linhas pontilhadas indicando o canal a ser dragado.

Aplicação do modelo hidrodinâmico para a análise da dragagem

Com o intuito de promover o gerenciamento integrado dessa área lagunar, foi proposta a utilização de um modelo numérico desenvolvido anteriormente na busca de informação sobre a viabilidade técnica da dragagem, analisando a sua eficiência ao longo do canal que liga o oceano à lagoa Manguaba, com a finalidade de dar subsídios a tomada de decisões dos órgãos gestores do estuário.

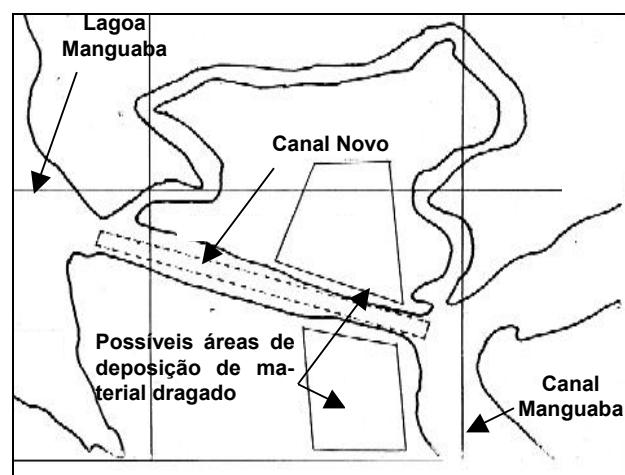


Figura 7 - Croquis do Canal Novo, na entrada da lagoa Manguaba, com as linhas pontilhadas indicando o canal a ser dragado.

A metodologia empregada constou da avaliação das variações de corrente e maré provocados pela dragagem num ponto dentro do canal, que vincula o oceano com a lagoa Manguaba e que, ao mesmo tempo, estivesse entre as áreas identificadas como de estrangulamento de fluxo. Assim, escolheu-se o ponto D (Figura 8), que apresenta tais características. A discretização espacial (Figura 8) definida para os canais permitiu estudar fenômenos relacionados à circulação das águas em grande escala, ou seja, fenômenos que aparecem em pequena escala como os vórtices, foram desprezados. Fez-se uso de uma grade de 91 x 87 elementos quadráticos e uniformes com largura de 100 m, tendo em vista que a menor largura encontrada nos canais foi de 150 m. Esta escolha faz com que o resultado não possa ser aplicado em setores mais estreitos do canal. Entretanto, uma discretização mais refinada aumentaria, ainda mais, o custo computacional, tornando-o inviável.

Utilizou-se para as condições de contorno, as séries registradas de maré das estações maregráficas, conforme descritas em Fragoso Júnior e Souza (2003):

- estação maregráfica do Vergel, na lagoa Mundaú;
- estação maregráfica de Marechal Deodoro, na lagoa Manguaba; e
- estação maregráfica da Barra, no Canal da Lagoa Mundaú.

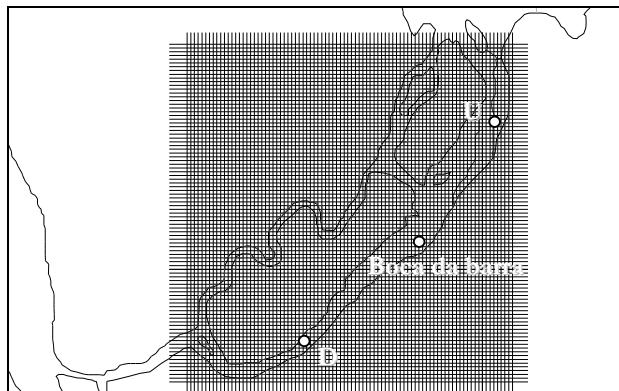


Figura 8 - Discretização aplicada nos canais de ligação para a aplicação do modelo numérico.

Para as condições iniciais do modelo, foi atribuído um valor médio igual a 1,12 m, quantificado em relação ao zero da DHN, para a elevação inicial de onda. Os registros de magnitude da velocidade média dos ventos estabelecida para entrada no modelo foram considerados constantes para todo domínio em um determinado instante. O coeficiente de atrito adotado foi de 0,035, sendo o incremento de tempo definido igual a 30 segundos e o período de simulação, de 16 horas. A Figura 9 mostra a circulação das águas no encontro dos canais com o oceano (boca da barra), em um determinado tempo de simulação.

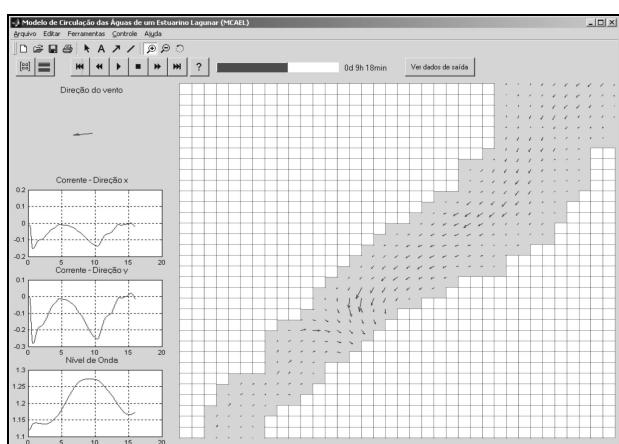


Figura 9 - Fluxo das águas na boca da barra para um tempo de 9 horas e 18 minutos de simulação.

RESULTADOS

Os resultados apresentados e discutidos abaixo estão relacionados a variação dos valores de corrente e maré em função do tempo, no ponto D (Figura 8) em duas situações distintas: antes e após a execução do projeto de dragagem. A análise e comparação da eficiência de troca d'água devido à modificação da batimetria do Complexo foi também realizada, levando-se em conta as regiões críticas de estrangulamento de fluxo consideradas no processo de modelagem, onde foram considerados: o esporão ao sul da Boca da Barra; os bancos rasos na região da Prainha; e o banco da Massagueira, desprezando o banco do Canal novo que está fora do domínio de análise.

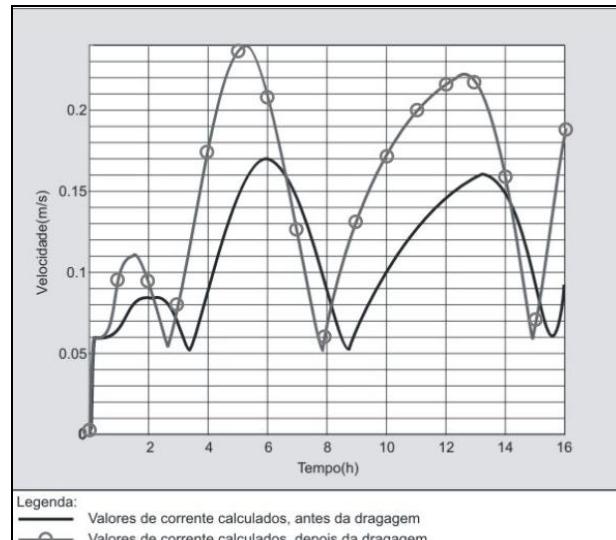


Figura 10 - Valor comparativo do comportamento das correntes obtidas pelo modelo, antes e depois da dragagem, no ponto D da Figura 8.

Ao final do processo de modelagem dos canais de ligação entre o oceano e as lagoas, verificou-se que houve um aumento considerável do fluxo de massa d'água que passa pela seção transversal no ponto D após a dragagem, em virtude da mudança de profundidade do fundo, em pontos a montante (sul da Boca da Barra e Prainha) e a jusante (Massagueira) do mesmo. Isto pode ser visto na Figura 10, que mostra os valores das correntes calculadas no ponto D antes e depois da dragagem, ao longo do período de simulação. Observou-se, uma ascensão de 0,17 m/s para 0,24 m/s da velocidade máxima adquirida por uma partícula d'água neste ponto, ou seja, um aumento de 41%. Esta taxa de acréscimo de velocidade se traduz em aumento de volume nas mesmas proporções, uma vez que a seção transversal do ponto D não se modificou. As curvas se apresentam defasadas em aproximadamente 40 minutos,

caracterizando uma comunicação mais eficiente ao longo do canal.

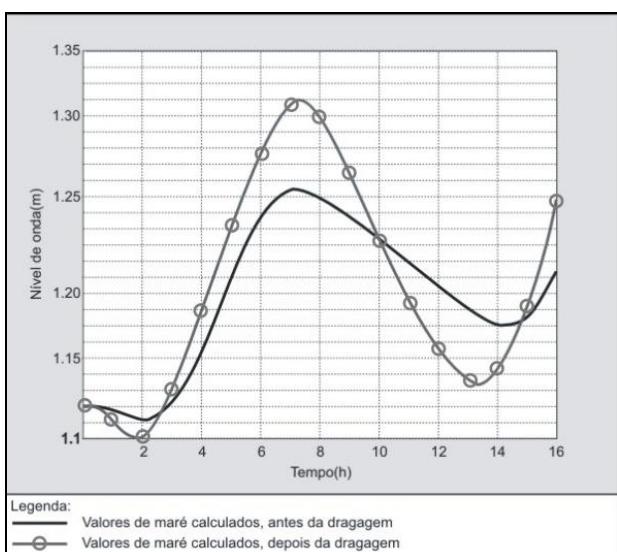


Figura 11 - Valor comparativo do comportamento das marés obtidas pelo modelo, antes e depois da dragagem, no ponto D da Figura 8.

A partir da Figura 11, que mostra a modificação do comportamento do nível de maré por ocasião da dragagem, observa-se que houve um ganho de energia neste processo. A amplitude máxima passou de 8,4 cm para 17,7 cm, i.e., um aumento de aproximadamente 110%. Isto indica que a dissipação de energia por atrito no fundo a jusante do ponto D (sul da Boca da Barra e Prainha) foi minimizada. Como este tipo de energia é proporcional ao quadrado da velocidade, a dragagem amorteceu consideravelmente a corrente nestas regiões de estrangulamento à passagem de fluxo d'água, tornando o regime do canal mais uniforme. Verificou-se, novamente, que as curvas se mostraram defasadas (aproximadamente 40 minutos) favorecendo uma troca mais efetiva entre as águas salgadas (oceano) e doces (rios).

As alterações topográficas de fundo no canal que vai de encontro à lagoa Manguaba não provocaram alterações sensíveis de corrente e maré no ponto U (Figura 8), localizado no canal que liga o oceano a lagoa Mundaú, conforme mostrado nas Figuras 12 e 13. Isto indica que os canais trabalham, praticamente, de forma independente, ou seja, a influência das modificações batimétricas efetuadas no canal da Manguaba em relação aos valores encontrados no canal da Lagoa Mundaú é desprezível.

Dentro do período de simulação escolhido, observa-se que a amplitude média da maré oceânica na direção da lagoa Manguaba, observada nas estações maregráficas do Pontal da Barra (Boca da Barra) e Marechal Deodoro (lagoa Manguaba), fica reduzida em 24% na passagem

do ponto D e decai para 4% dentro da lagoa Manguaba (Figura 14), fato que demonstra claramente que o canal de ligação possui baixa eficiência na comunicação. Com a dragagem a porcentagem de energia dissipada por atrito passa de 76% para aproximadamente 50% no ponto D, que indica um aumento do prisma de maré, possibilitando uma maior renovação das águas do sistema a cada ciclo de maré, uma vez que parte da água interior é trocada por água oceânica.

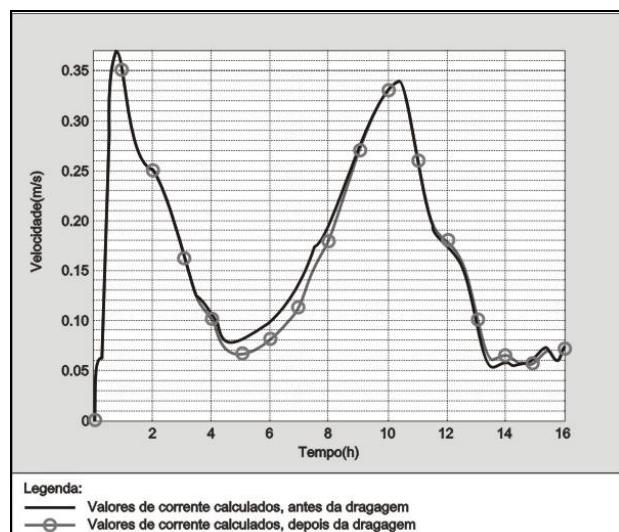


Figura 12 - Valor comparativo do comportamento das correntes obtidas pelo modelo, antes e depois da dragagem, no ponto U da Figura 8.

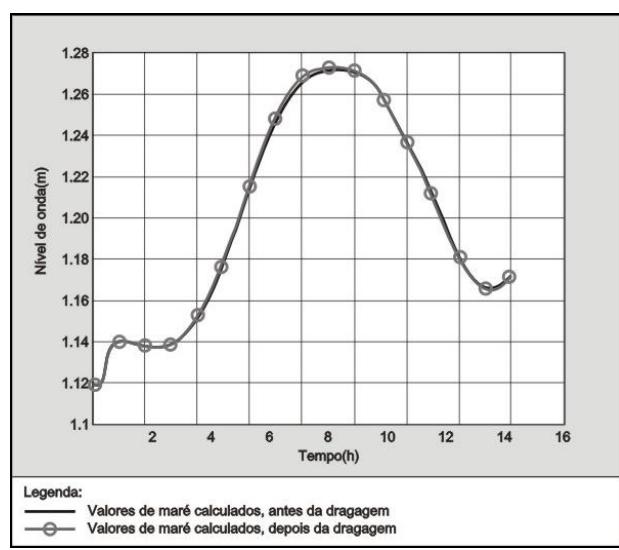


Figura 13 - Gráfico comparativo do comportamento das marés obtidas pelo modelo, antes e depois da dragagem, no ponto U da Figura 8.

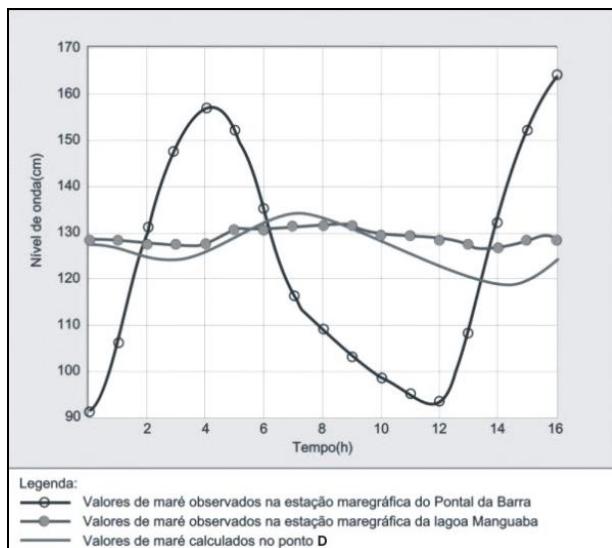


Figura 14 - Visualização do prisma de maré calculado no ponto D da Figura 8, e do nível de maré observado nas estações maregráficas.

CONCLUSÃO

O modelo se apresentou como uma ferramenta indispensável aos estudos relacionados aos fenômenos quantitativos hidrodinâmicos e à previsão dos efeitos provocados pela dragagem no canal que liga à lagoa Manguaba, pois permite integrar informações espacialmente dispersas, interpolar informações para regiões nas quais não há medições, ajudar a interpretação de medições feitas em estações pontuais, propiciar entendimento da dinâmica de processos, prever situações a partir da simulação de cenários futuros, etc.

Para o cenário proposto (após a realização da dragagem), o modelo de circulação de águas indicou um aumento de aproximadamente 41% do fluxo de massa e uma ampliação do prisma de maré em 110% na seção transversal onde se localizam as áreas críticas de estrangulamento ao fluxo d'água, no canal da Manguaba. O que promove uma comunicação mais eficiente entre as águas do oceano com as da lagoa Manguaba, bem como uma considerável minimização da energia dissipada no sul da Boca da Barra e Prainha. Pode-se inferir, ainda, que as modificações de fundo, em virtude da dragagem no canal da Manguaba, não afetam as propriedades da corrente e do nível maré no canal da Mundaú.

Os estudos de modelagem mostram que a obra é tecnicamente viável, uma vez que a eliminação das áreas de estrangulamento torna a troca de água entre o oceano e as lagoas mais eficiente, diminuindo, assim, as perdas de energia por atrito. Entretanto, faz-se necessária a realização de estudos de qualidade da água nas lagoas, antes e durante

a dragagem para que seja possível avaliar a ressuspensão de nutrientes dos sedimentos e sua disponibilização na coluna d'água, visando uma gestão integrada e um efetivo gerenciamento ambiental. A grande carência de monitoramento contínuo dos estuários, visando acompanhar a resposta do sistema, bem como a não existência de campanhas de educação ambiental para a preservação dos mangues, faz com que a dragagem por si só não resolva os problemas existentes. Dessa maneira, haverá sempre a necessidade de realização de novas dragagens no futuro, tendo em vista que a circulação natural da água promoverá nova deposição.

Oliveira (1997) comenta que estudos de impactos ambientais que venham a ser realizados no CELMM não serão suficientes para prever o que ocorrerá no sistema estuarino, devido a seu grande dinamismo. Portanto, faz-se necessário o monitoramento ambiental contínuo do Complexo, o que poderá recomendar, mudanças na cota do fundo do canal determinada no projeto de dragagem, nos volumes e na área a ser dragada.

Por fim, espera-se que os resultados deste trabalho sejam avaliados pelas entidades governamentais, responsáveis pelo estuário alagoano, e, que as próximas alterações sejam corretamente planejadas, monitoradas, simuladas, com a preocupação da preservação ambiental. Só assim pode ser feita uma gestão integrada dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J.L.D.S.S. de (1999). *Análise da contaminação dos sedimentos de dragagem do Canal do Fundão*. Rio de Janeiro, 152p. Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- BENQUÉ, J. P.; CUNGE, J. A.; FEUILLETET, J.; HAUGUEL, A. e HOLLY JR., F. M. (1982). New method for tidal current computation. *Journal of the Waterway, Port, Coast and Ocean Division*. ASCE. 108, nº WW3.
- BORMA, L. de S. (1998). *Acidificação e liberação de metais pesados em sedimentos dragados ricos em sulfetos de Fe*. Rio de Janeiro, 183p. Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- CABRAL, M., IMA e SEMPMA iniciam dragagem no complexo lagunar. Maceió, 2002. Desenvolvida por: Vieira, R., Disponível em: www.ima.algov.br/nota05.htm
- CAMARGO JÚNIOR, A. (2000). *Sistema de Gestão Ambiental em Terminais Hidroviários e Comboios Fluviais: Contribuições para o Desenvolvimento Sustentável na Hidrovía Tietê-Paraná*. Rio Claro. 109p. Doutorado em Geociências (Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

- CASULLI, V. (1990). Semi-implicit finite-difference methods for the two-dimensional shallow water equation. *Journal of Computational Physics*. 86: 56 – 74.
- COLLISCHONN, W. e MARQUES, D. L. M. (2003). Desenvolvimento de um modelo hidrodinâmico de transporte de sedimentos e nutrientes para lagos. *Anais do IX Congresso Brasileiro de Limnologia*. Juiz de Fora-MG.
- COUTINHO, P.N. (1986), Sugestões para gerenciamento de estuários. In: *Arg. Ciênc. Mar.* Fortaleza, 77-86.
- DAVIS, R. A. JR. (1996). Coasts. Prentice Hall, Earth Sciences Series.
- FRAGOSO JR., C. R. e SOUZA, C. F. (2003). *Análise de uma proposta de dragagem no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba através de um modelo hidrodinâmico bidimensional*. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil/ Universidade Federal de Alagoas.
- IMA-AL & GTZ (1995). Guia do Meio Ambiente. 3ª. edição revisada, Maceió-AL.
- KJERFVE, B. (1992). *Evaluating Environmental Effects of Dredged Material Management Alternatives – A Technical Framework*. (Department of the Army – United States Army Corps of Engineers and United States Environmental Protection Agency). Washington, DC.
- OLIVEIRA, A. M. & B. KJERFVE (1993). Environmental Responses of a Tropical Coast Lagoon to Hydrological Variability: Mundaú-Manguaba, Brazil. *Estuarine, Coast and Shelf Science*, 575-591.
- OLIVEIRA, A. M. (1997). *Identificação das áreas críticas ao fluxo entre o estuário e as lagoas Mundaú-Manguaba com dimensionamento de dragagens*. Maceió: FUNDEPES.
- OLIVEIRA, A. M. (2000). *Hidrodinâmica do Complexo*. In: *Apoio à proteção ambiental em Alagoas: uma experiência de cooperação técnica*. Maceió: SEPLAN/IMA/GTZ. 66-77.
- PASENAU (1998). *Levantamento Batimétrico dos Canais do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba. Levantamentos de Campo*. Maceió: Projeto IMA/GTZ.
- ROSMAN, P.C.C.. (1999) Subsídios para Modelagem de Sistemas Estuarinos. In: *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 3, 229-343.
- SANTOS, A.C.B. dos (2001). *Avaliação do acréscimo de polímeros na disposição de sedimentos dragados*. Rio de Janeiro, 215p. Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- SCHETTINI, C.A.F. (2001). *Dinâmica de Sedimentos Finos no Estuário do Rio Itajaí - Açu, SC*. Porto Alegre, 200p. Doutorado em Geociências – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SOUZA, R. C.; KJERFVE, B. (1997). Fundamentos da Maré e sua Predição. *Anais do XX Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional*. Gramado/RS.
- SOUZA, R. C. (1998). *Análise e parecer técnico do projeto: Identificação das áreas críticas ao fluxo entre o estuário e as lagoas Mundaú-Manguaba com dimensionamento de dragagens*. CEPRAM – Conselho Estadual de Proteção Ambiental. Maceió.
- SOUZA, R. C., LAGES, E. N., FRAGOSO JUNIOR, C. R. e SOUZA, C. F. (2003). Um modelo Numérico Hidrodinâmico Bidimensional no Estudo do Complexo Estuarino-lagunar Mundaú-Manguaba. No prelo. *Revista da Universidade do Minho (Portugal)*.
- TORRES, R.J. (2000). *Uma análise preliminar dos processos de dragagem do Porto de Rio Grande, RS*. Rio Grande, 190p. Mestrado em Engenharia Oceânica – Fundação Universidade Federal do Rio Grande.
- An Analysis in the Dredging of the Mundaú/Manguaba Estuarine-Lagoon Complex in Alagoas using Two-dimensional Hydrodynamic Numerical Model - Preliminary results***
- ABSTRACT**
- The objective of this research is to prepare a schematic proposal for an action plan and integrated management of a lagoon ecosystem. The case of the Mundaú/Manguaba estuarine-lagoon complex (CELMM) system located southeast of the city of Maceió, state of Alagoas, is used as an example. It is necessary to develop a strategic intervention program in the region covered by CELMM, with definitions of structural and non-structural measures and necessary institutional arrangements in order to be sure that the actions will be implemented. In this study, a proposal to dredge CELMM is presented by simulating a two-dimensional hydrodynamic numeric model. The purpose of this engineering work is to allow greater exchange of water between the continent and the ocean, partially solving the hydrodynamic problem, and enabling a certain amount of cleaning in the estuary. Among the main preliminary results of this implementation is the increased prism of tides and mass flow.
- Key Words:** dredging; model; hydrodynamics.