

FACEPE pelo apoio ao GMFA-UFPE.

### **Referências**

GMFA-UFPE, 1998, “Levantamento da Propagação da Maré Hidráulica e Batimetria para a Navegabilidade do Rio Massangana – SUAPE” , Relatório Técnico para SUAPE – Complexo Industrial Portuário, Recife/PE, 100 p.

BORCHE, A., 1996, “IPH-A : Aplicativo para Modelação de Estuários e Lagoas - Manual de Uso”, Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS – Porto Alegre/RS, 37 p.

BAGETTI, A. M. B. e ARAÚJO, A. M., 1998, “Desenvolvimento de Régua Linimétrica Auto- Suportada”, VI Congresso de Iniciação Científica, pp. 667, UFPE/PROPESQ, Recife/PE.

SILVEIRA, A.L.L. e TUCCI, C.E.M., 1998, “Simulação do escoamento Bidimensional no Guaíba”, in RBE – Revista Brasileira de Engenharia, 6(1):79-104.

MUNSON, B.R.; YOUNG, D.F. e OKIISHI, T.H., 1997, “Fundamentos da Mecânica dos Fluidos”, vol. 2, Editora Edgar Blücher, São Paulo, 600p.

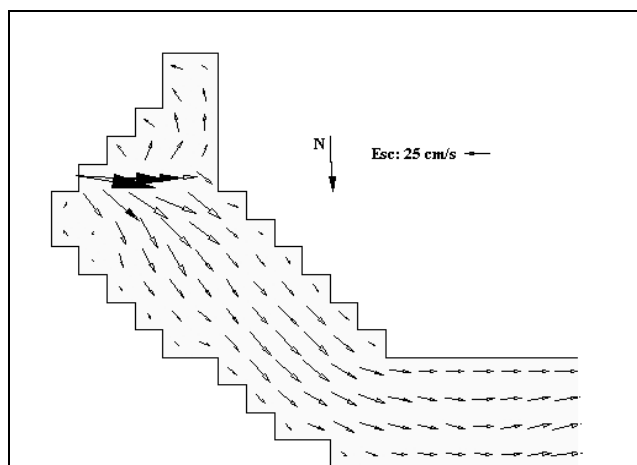


Figura 8 – Detalhe do mapa de correntes – instante 17:20 da simulação

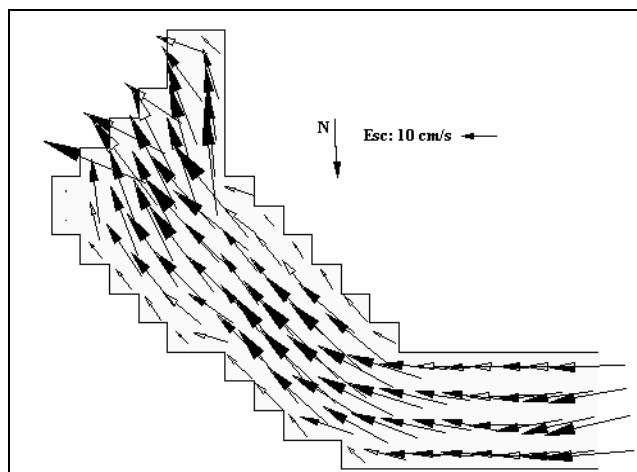


Figura 9 – Detalhe do mapa de correntes – instante 23:40 da simulação

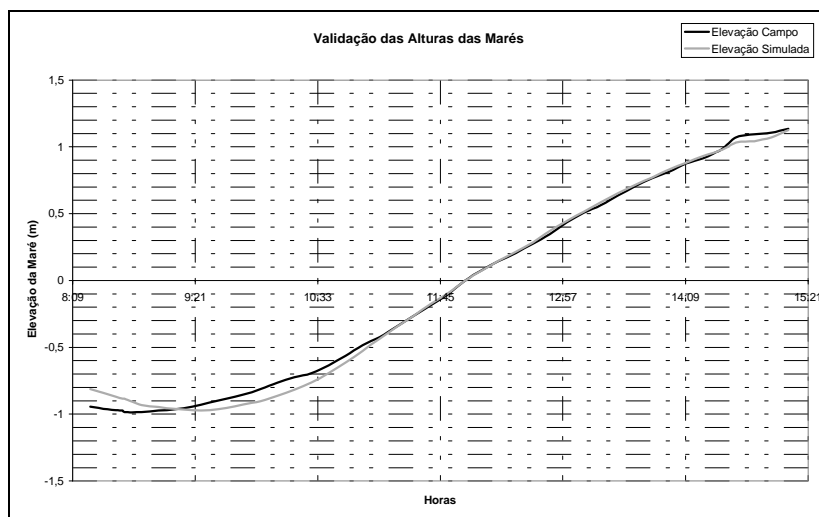
## Conclusões

O modelo bidimensional horizontal adotado neste trabalho para o estuário do Rio Massangana, com 789 células quadradas úteis de  $2500 \text{ m}^2$ , representou de maneira satisfatória um corpo d'água de escoamento complexo, que em sua circulação hidrodinâmica sofre grande influência das condições de contorno naturais (forçantes de maré em RM1 e RM3) e artificiais (desvio do escoamento pelo canal dragado).

A variação nos valores do parâmetro de ajuste do sistema computacional permitiu uma boa concordância das curvas de elevação de maré, medidas em dois locais distintos do estuário, com as curvas previstas pelo sistema. Assim, o sistema computacional usado estaria potencialmente apto para desenvolver prognósticos tanto do regime de elevações quanto do de circulações hidrodinâmicas no estuário, nas suas condições típicas de maré de sizígia, causados por intervenções de engenharia.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a SUAPE – Complexo Industrial Portuário, em especial à Gerência de Preservação Ecológica e Cultural (GEPE), pela oportunidade do trabalho e ao CNPq e à



**Figura 7 - Comparação da Altura de Maré Medida no dia 26-06-1998 com a Altura Simulada para a Régua RM4**

Os resultados apresentados indicam que com referência à régua RM2 ocorreu um desvio relativo médio à medida de campo de 4,3%, sendo que o menor desvio observado foi nulo e o maior desvio observado foi de 14,2%. Já na régua RM4 foi observado um desvio relativo médio à medida de campo de 5,1%, sendo que o menor desvio observado foi de 0,2% e o maior desvio observado foi de 13,8%. Estes resultados indicam que a discretização utilizada e o ajuste de parâmetro de rugosidade de fundo obtido ( $n= 0,0325$ ), constante em todo o estuário, representam de forma satisfatória a dinâmica de propagação daquela maré no estuário do Rio Massangana.

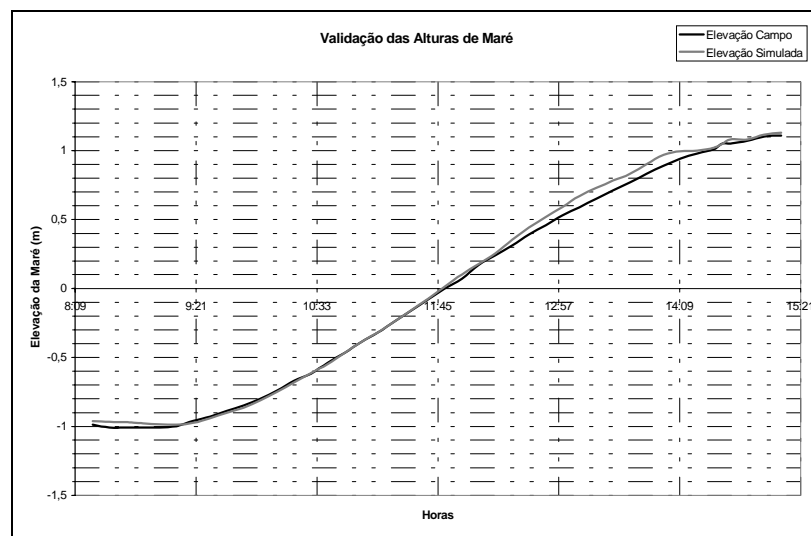
### **Aspectos dos Campos de Velocidades Obtidos**

Os sentidos das correntes em diferentes instantes de um mesmo ciclo de maré podem ser observados nas figuras abaixo. No instante 17:20h a velocidade do fluxo atinge seu máximo, escoando para dentro do estuário (Fig. 8). A situação aproximadamente simétrica ocorre às 23:40h (Fig.13). Os vórtices observados na entrada do estuário na Figura 8 pode ser causados tanto pela forma geométrica do estuário na sua entrada quanto por um processo de assoreamento local. Este depósito de material granular (banco de areia) pode ser originado pelo sentido do forçante de maré, que causa acúmulos na parte sul da boca do estuário.

A calibração do modelo foi realizada através do ajuste do parâmetro de rugosidade de fundo, sendo balizada pela aderência entre as elevações medidas em campo e as simuladas. Nas primeiras tentativas utilizou-se como condição de contorno de nível apenas os dados da régua na foz do estuário (seção RM1) na Figura 1, porém os resultados obtidos não se ajustaram aos outros 3 locais de controle de linimetria (níveis). Passando a considerar no modelo a existência de um outro forçante de maré, causado por um pequeno braço natural do rio na altura da seção RM3, e por esse motivo incluindo os dados da régua situada próximo à entrada do canal dragado (RM3, fluxo da direita para a esquerda da figura) como condição de contorno de nível, foi obtida uma calibração considerada satisfatória para o modelo. Esta última consideração poderia ser adicionalmente justificada pela antiga intervenção de dragagem realizada entre as estações RM3 e RM4 para o canal de testes da indústria de barcos Diamar (RM4), o que provavelmente alterou o regime original de propagação da maré no estuário. As setas na Figura 1 indicam a direção principal do forçante de maré observado no estuário do Massangana (RM1) e a seta na régua RM3 indica a condição de contorno de nível adicional imposta para a calibração do modelo.

Uma calibração mais rigorosa do modelo também exigiria dados dos campos de velocidades produzidos no estuário para efeito de comparações. Entretanto, o estado atual das condições práticas de medidas de campo ainda não permite a obtenção de dados, em qualidade e quantidade, para o ajuste do parâmetro velocidade.

Os gráficos de elevação *versus* tempo para as régua RM2 e RM4 mostrados nas Figuras 6 e 7 revelam, de forma comparativa, os resultados da alturas de maré simuladas com as medidas em campo.



**Figura 6 - Comparação da Elevação de Maré Medida no dia 26-06-1998 com a Altura Simulada para a Régua RM2**

## Régua RM4

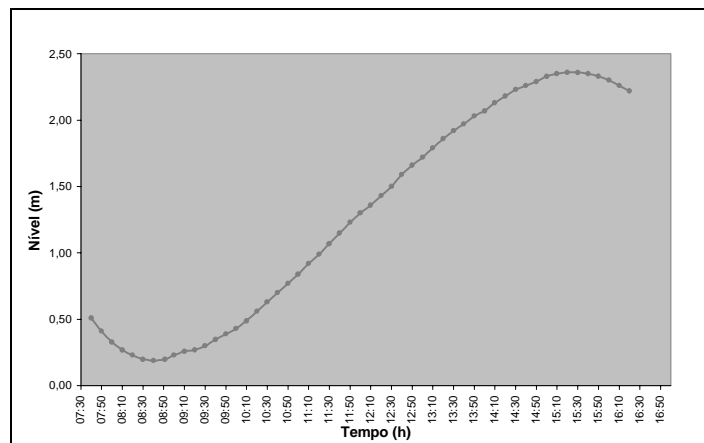


Figura 5 - Representação das leituras das régua linimétricas (RM4) no dia 22/06/98

## Representação Computacional do Massangana

O modelo bidimensional utilizado para simular o estuário do Rio Massangana foi constituído por uma malha formada por 789 elementos úteis, distribuídos em 64 linhas e 88 colunas de cálculo. Os elementos da malha são células quadradas (50mx50m) de 2500 m<sup>2</sup>. A orientação e a localização da malha de cálculo foi definida com sua latitude média, que é de 8° S, e pelo ângulo entre o eixo Y da malha e o norte geográfico, como se vê no sistema de coordenadas expresso na Figura 1.

As profundidades médias de cada célula foram estipuladas com base em trabalhos de levantamentos batimétricos realizados pelo GMFA-UFPE (1998), para o Complexo Industrial Portuário de Suape.

## Calibração do modelo

Inicialmente verificou-se a estabilidade numérica do modelo com a malha adotada, usando-se um teste prático preliminar para simular um forçante de maré no estuário, sendo utilizado para tal fim procedimento descrito em Silveira e Tucci (1988). Os resultados obtidos indicaram que a discretização espacial, adotada com a de tempo (30s) garantiriam uma boa representação espacial do sinal de propagação da maré pelo estuário, estando assim os resultados do modelo potencialmente livres de perturbações de origem numérica.

Escolheu-se a rugosidade do fundo como parâmetro de calibração do modelo pelo fato do mesmo ser variável no espaço e no tempo, tornando muito difícil a determinação de seus valores em cada elemento da discretização. Entretanto, o coeficiente de Chèzy utilizado pelo modelo é dado por  $C_h = H^{1/6}/n$ , onde H é a profundidade em cada elemento e n é o coeficiente de Manning. O sistema computacional IPH-A permite a entrada de dados de rugosidade de duas formas: entrar com um valor constante do coeficiente de Manning para todo o estuário – de modo que o coeficiente de Chèzy dependa somente da profundidade local – ou inserir para cada elemento da malha um valor arbitrado do coeficiente de Chèzy, procedimento indicado para estuários que possuam materiais de fundo diferentes em cada trecho analisado.

Devido à relativa uniformidade do material de fundo do Massangana, os valores de rugosidade foram introduzidos através do coeficiente de Manning (n) com valores constantes, tomando-se variações a partir de valores típicos para rios estuarinos, conforme Munson *et al.* (1997).

## Régua RM1

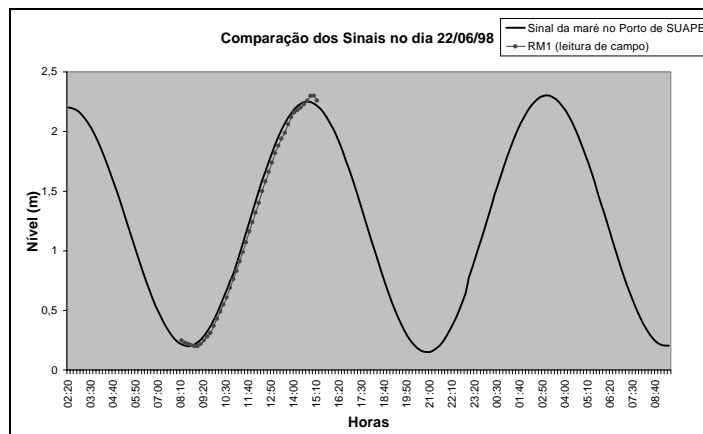


Figura 2 - Representação das leituras das régua linimétricas (RM1) no dia 22/06/98

## Régua RM2

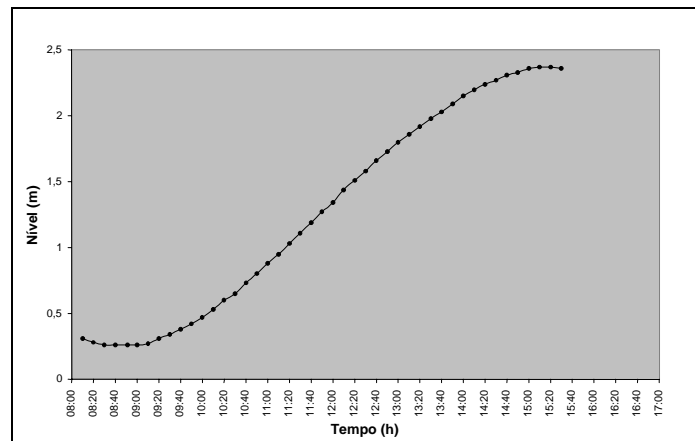


Figura 3 - Representação das leituras das régua linimétricas (RM2) no dia 22/06/98

## Régua RM3

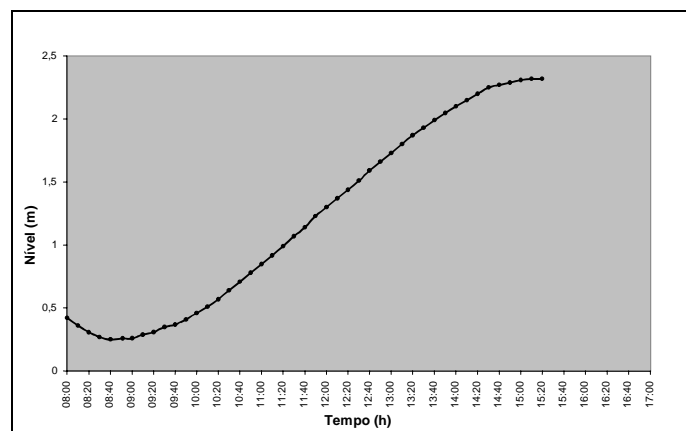


Figura 4 - Representação das leituras das régua linimétricas (RM3) no dia 22/06/98

## Equações dinâmicas

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - \Omega V + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gU\sqrt{U^2 + V^2}}{C_h^2 H} - \frac{\tau_{sx}}{H} - v_t \Delta U = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \Omega U + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gV\sqrt{U^2 + V^2}}{C_h^2 H} - \frac{\tau_{sy}}{H} - v_t \Delta V = 0 \quad (3)$$

onde:

$U, V$  componentes do vetor velocidade nas direções  $x$  e  $y$  ( $m s^{-1}$ )

$\zeta$  nível medido a partir do plano de referência fixo (m)

$h$  profundidade referida a este plano (m)

$H$  profundidade total ( $H = h + \zeta$ ) (m)

$\Omega U, V$  aceleração de Coriolis ( $m s^{-2}$ )

$\tau_{sx}, \tau_{sy}$  componentes da tensão de cisalhamento na superfície (MPa)

$C_h$  coeficiente de Chèzy ( $m^{1/2} s^{-1}$ )

$v_t$  coeficiente de dissipação turbulenta ( $m^2 s^{-1}$ )

$\Delta U, V$  operador laplaciano das velocidades ( $m^{-1} t^{-1}$ )

Em cada intervalo de tempo, o cálculo é realizado em duas etapas: primeiro é efetuado, em cada linha, o cálculo do nível e da componente  $U$  da velocidade através da resolução de um sistema linear tridiagonal pelo método de dupla varredura. A segunda etapa consiste na determinação das componentes  $V$  das velocidades e de novos níveis repetindo para as colunas o mesmo tipo de cálculo realizado para as linhas na primeira etapa (Borche, 1996).

## Resultados Obtidos

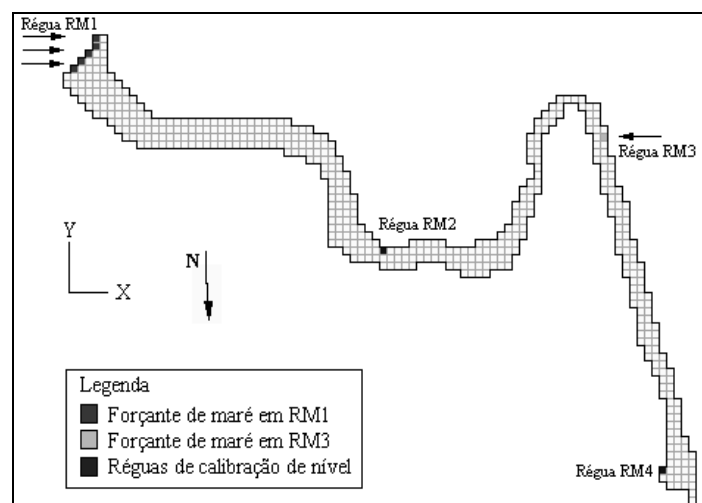
### Propagação da Maré Hidráulica

Da Figura 2 a seguir pode-se observar que o sinal de maré, na estação RM1, apresentou praticamente as mesmas características físicas (amplitude e fase) do sinal do Porto de Suape. A falta de aderência das medidas em RM1 ao sinal de Suape, apenas nos instantes próximos da preamar, pode ser explicada pela atuação do componente meteorológico local. De fato, neste período ocorreram fortes rajadas de vento que podem ter provocados ondas superficiais, as quais poderiam explicar as medidas de campo que estão indicadas no gráfico (GMFA-UFPE, 1998). Para as demais réguas RM2, RM3 e RM4 instaladas estuário adentro (ver Figura 1), as elevações medidas simultaneamente às de RM1 estão indicadas nas Figuras 3, 4 e 5 a seguir.

estação RM1 – Réguas Massangana 1, localizadas na foz do Rio Massangana; estação RM2 – Réguas Massangana 2 localizadas a cerca de 2800m a montante de RM1; estação RM3 – Réguas Massangana 3 localizadas a cerca de 2550m a montante de RM2; e a estação RM4 – Réguas Massangana 4 localizadas a cerca de 2200m a montante de RM3, em frente à rampa de acesso da fábrica de barcos Diamar (Figura 1).

Em cada estação foram instaladas 2 réguas linimétricas, sendo uma plana e outra auto-suportada, desenvolvida pelo GMFA-UFPE para os estudos em questão (Bagetti e Araújo, 1998). As leituras foram realizadas a intervalos de 10 minutos e os dados obtidos foram utilizados para o traçado das respectivas curvas de marés.

As sondagens batimétricas foram realizadas em seções perpendiculares ao eixo do estuário do Rio Massangana espaçadas por 50m entre si e os pontos batimétricos consecutivos de uma mesma seção são equidistantes de 10m.



**Figura 1- Representação da discretização do estuário do Rio Massangana (com suas condições de contorno)**

## Simulação Computacional

O método do sistema computacional utilizado neste trabalho para a resolução numérica das equações que modelam o escoamento tem como base as técnicas de diferenças finitas, semi-implícitas, de direções alternadas. As equações da continuidade e dinâmica, previamente integradas na vertical, consideram a perda de carga junto ao fundo, a ação do vento na superfície e a força de Coriolis.

A aplicação deste sistema é válido para corpos d'água que possuem dimensões horizontais predominantes relativamente às verticais, no qual as componentes horizontais da velocidade podem ser descritas por valores médios na vertical. Esta condição permite que se utilize modelos bidimensionais no plano horizontal (2D-H) para a simulação da sua circulação hidrodinâmica, simplificando em muito a modelação.

Para descrever matematicamente o escoamento em corpos d'água pouco profundos são utilizadas as seguintes equações para o caso bidimensional horizontal:

Equação da continuidade

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$



## CALIBRAÇÃO DE MODELO DE CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA NO ESTUÁRIO DO RIO MASSANGANA / SUAPE – PE

**Alex Maurício Araújo<sup>1</sup>**

**Josafat Marinho Falcão Neto<sup>2</sup>**

**Carolina Caheté Silva<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Mecânica, 50740-530, Recife, PE, Brasil. E-mail: ama@npd.ufpe.br

<sup>2</sup>Endereço atual: Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Oceanografia, 50740-540, Recife, PE, Brasil. E-mail: jfalcao@usa.net

### **Resumo**

Estudos de campo da propagação da maré hidráulica média anual de sizígia pelo estuário do Rio Massangana, próximo ao porto de Suape-PE, conduziram a uma calibração de um sistema de simulação computacional, voltado para a previsão da circulação hidrodinâmica induzida por marés no local. O sistema utilizado é bidimensional horizontal (2D-H), baseado nas equações de águas rasas, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. A calibração consistiu na comparação direta entre sinais de maré, usando-se como parâmetro de ajuste a rugosidade de fundo. Aproximou-se a área do espelho líquido do estuário por uma malha quadrada de diferenças finitas com 789 elementos. Inicialmente, utilizou-se como condição de contorno de nível apenas os dados linimétricos na foz do estuário, porém os resultados obtidos não se ajustaram aos outros locais de controle de linimetria. Entretanto, incluindo o contorno de nível da régua próxima ao canal dragado, obteve-se uma calibração satisfatória do modelo.

**Palavras-chave :** Circulação, Hidrodinâmica, Calibração, Suape.

### **Introdução**

Os estuários são corpos d'água governados hidráulicamente pela ação das marés e dos rios; particularmente, as marés resultam dos efeitos astronômicos e distúrbios meteorológicos locais. Os efeitos das forças gravitacionais (lua, sol e planetas) podem ser previstos com alta precisão, sendo que os meteorológicos são aleatórios e de difícil previsão, exceto nos casos de algumas tendências sazonais; no Nordeste do Brasil, em especial no verão, as marés são dominantes. Os objetivos deste artigo são os de apresentar os resultados dos levantamentos de campo da propagação da maré hidráulica e da calibração de um modelo de simulação computacional da circulação hidrodinâmica induzida por marés, para o caso do estuário do Rio Massangana, situado no Complexo Industrial Portuário de Suape, em Pernambuco.

### **Propagação da Maré Hidráulica**

A caracterização da propagação da maré média anual de sizígia ao longo do estuário do Rio Massangana foi baseada em leituras de régua linimétrica instaladas em 4 estações: