

# XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

## **SIMULAÇÕES DA HIDRODINÂMICA DA LAGOA MANGUEIRA (RS)**

*Carlos Ruberto Fragoso Júnior<sup>1</sup>; Regina Camara Lins<sup>2</sup>; Walter Collischonn<sup>3</sup> & David da Motta Marques<sup>4</sup>*

**Resumo** – Os processos hidrodinâmicos são responsáveis pelo transporte de nutrientes e plâncton em ecossistemas aquáticos. Neste trabalho é apresentado um modelo hidrodinâmico bidimensional que trata dos fluxos quantitativos, associado a um algoritmo de secagem e inundação, no intuito de entender melhor os fluxos na Lagoa Mangueira localizada na parte sul do Estado do Rio Grande do Sul. O módulo hidrodinâmico foi resolvido numericamente utilizando um esquema semi-implícito de diferenças finitas. As simulações mostraram que os fluxos da Lagoa Mangueira são dominados pelo vento. Os vetores de velocidade são mais intensos na região litorânea, enquanto que na região pelágica foram encontrados valores mais baixos de velocidade. Diversas zonas de recirculação da água foram encontradas. O modelo proporcionou um melhor entendimento dos padrões hidrodinâmico da Lagoa Mangueira.

**Abstract** – Hydrodynamic processes are responsible to transport nutrients and plankton in aquatic ecosystems. In this research we presented a two-dimensional hydrodynamic model that deals with the quantitative flows, associated to a dry/wet algorithm, in order to understanding the flows in the Lake Mangueira, located in the coastal south part of the state of the Rio Grande do Sul. The hydrodynamic module was solving by a differences finite semi-implicit scheme, with a mixing approach Eulerian-Lagrangian for the advective terms. The model provided us a better understanding of the hydrodynamic patterns of the Lake Mangueira.

**Palavras-Chave** – Modelos hidrológicos; qualidade da água; SIG.

---

<sup>1</sup> Professor Adjunto da Universidade Federal de Alagoas (CTEC/UFAL): Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins - Maceió - AL, CEP: 57072-970, Centro de Tecnologia, (82) 3214-1605, crubertofj@hotmail.com

<sup>2</sup> Mestranda do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS): Av. Bento Gonçalves, 9500 - CEP 91501-970. Caixa Postal 15029 - Porto Alegre - RS - Brasil, Fone (51) 3308-6686; Fax (51) 3308-7291, reginacamaralins@hotmail.com.

<sup>3</sup> Professor Adjunto do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS): Av. Bento Gonçalves, 9500 - CEP 91501-970. Caixa Postal 15029 - Porto Alegre - RS - Brasil, Fone (51) 3308-6686; Fax (51) 3308-7291, collischonn@iph.ufrgs.br.

<sup>4</sup> Professor Adjunto do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS): Av. Bento Gonçalves, 9500 - CEP 91501-970. Caixa Postal 15029 - Porto Alegre - RS - Brasil, Fone (51) 3308-6686; Fax (51) 3308-7291, dmm@iph.ufrgs.br.

## INTRODUÇÃO

A importância de lagos e estuários para a humanidade é verificada, historicamente, a partir da constatação da preferência de áreas próximas a estes ambientes para o povoamento e desenvolvimento de cidades. Dois terços das grandes cidades do mundo, como, Porto Alegre, Maceió, Rio de Janeiro, Xangai, Londres e Nova Iorque, estão localizadas na vizinhança imediata destes ambientes (Souza & Kjerve, 1997).

Ao mesmo tempo em que a diversidade física e a produtividade biológica são características destes sistemas, também é reconhecida a sua fragilidade frente às agressões antrópicas típicas de grandes centros urbanos (despejos de efluentes, captação de água para abastecimento, irrigação, pesca, etc) (Fragoso Jr. *et al.*, 2003; Chapra, 1997; Los, 1991). Estas explorações podem afetar fortemente a comunidade biológica, a diversidade da fauna muitas vezes ameaçada de extinção, bem como alterar padrões de qualidade da água, chegando a prejudicar ou inviabilizar os usos desta mesma água para abastecimento, recreação e irrigação. Nesse sentido, é necessário um esforço de otimização entre as aptidões do meio ambiente e a exploração humana através de uma gestão racional (Coutinho, 1986), onde toda a interferência externa, assim como o comportamento hidrodinâmico, químico e biológicos dentro do sistema sejam cuidadosamente estudados, simulados, observados e monitorados com continuidade para evitar o desequilíbrio ambiental nesses corpos d'água.

Modelos matemáticos hidrodinâmicos aliados aos modelos de transportes de sedimento e de nutrientes podem ser utilizados para simular as diferentes ações antrópicas em lagos, reservatórios e estuários, e, assim, auxiliar na busca de soluções de manejo ótimas do ponto de vista econômico e ambiental. Desta forma, um modelo hidrodinâmico, de transporte de sedimentos e nutrientes e biológico foi desenvolvido visando obter entendimento dos principais processos destes ecossistemas. Este artigo apresenta, brevemente, o desenvolvimento deste modelo e alguns resultados relacionados aos padrões hidrodinâmicos da Lagoa Mangureira (RS), no Sul do Brasil.

## **METODOLOGIA**

### **Curta descrição do modelo**

O módulo hidrodinâmico é uma adaptação do modelo TRIM2D, desenvolvido por Casulli e Cheng (1992). O TRIM2D é um modelo bidimensional na horizontal de diferenças finitas e emprega o esquema semi-implícito para a solução das equações de hidrodinâmica de águas rasas. Este modelo vem mostrando ser convergente, estável e preciso (Casulli & Cattani, 1994), podendo ainda ser aprimorado para o emprego de grades não estruturadas no domínio (Casulli & Cattani, 1994). Foi utilizada uma grade computacional regular com as velocidades definidas nas faces médias da célula computacional e a elevação da superfície da água definida no centro da célula. As equações de águas rasas não têm solução analítica direta. O método de diferenças finitas resolve as equações governantes para um número finito de pontos no espaço e no tempo. Este método necessita subdividir o domínio de aplicação em uma malha, com um número finito de células. As equações são discretizadas espacialmente em uma grade retangular que consiste em células computacionais quadradas com comprimento  $dx$  e largura  $dy$ . Foi utilizada uma malha computacional de 100 x 100 m, a qual gerou aproximadamente 100.000 células computacionais ativas. Cada célula é numerada em seu centro, com os índices  $i$  e  $j$ , que se referem, respectivamente, à posição da célula nos eixos  $x$  e  $y$ . O modelo hidrodinâmico foi previamente ajustado em Frago Jr. (2005).

### **Cenários de simulação**

No intuito de compreender melhor a circulação da Lagoa Mangueira em grande escala foram definidos os seguintes cenários de simulação:

(a) Modelação dos fluxos das águas focando a parte sul da Lagoa Mangueira. Foi definido um vento no sentido sudoeste com intensidade de 15 m/s, com duração de 5 horas. Na sequência a direção do vento foi modificada para o sentido nordeste.

(b) Modelação da transferência de material suspenso particulado do Banhado para a Lagoa Mangueira. Esse cenário avaliou o transporte de material suspenso na interface Banhado do Taim e Lagoa Mangueira (parte norte) utilizando como base a solução hidrodinâmica. Foi admitido que o material suspenso é equivalente a um derivador ou lagrangiano, que adquire a mesma velocidade da água. A sua posição é atualizada para cada passo de tempo. Desta forma, foi lançada uma partícula, caracterizada por um ponto em vermelho, em cada célula da região do Banhado do Taim. Para esta simulação foi utilizada a solução hidrodinâmica do período de calibração do modelo que

corresponde a um tempo total de 26 dias de simulação, iniciando às 16:00 hs do dia 10/07/2002 e finalizando às 15:00 hs do dia 05/08/2002.

(c) Simulação de transporte de um poluente na parte central da Lagoa Mangueira. Esta análise consiste no transporte de um escalar genérico e conservativo, ou seja, na equação de transporte não foram considerados termos de perdas e/ou ganhos de matéria. A concentração inicial do poluente é de  $10 \text{ g/m}^3$ , definido para cada célula encontrada na faixa entre o centro e o sul da lagoa Mangueira, enquanto que o restante da lagoa apresenta concentração zero. A escala de cores indica que as células cujos valores de concentração forem maiores ou iguais a  $10 \text{ g/m}^3$  serão apresentados em vermelho, valores de concentração iguais a zero serão indicados pela cor azul e os valores intermediários serão plotados em amarelo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O fluxo das águas na parte sul da Lagoa Mangueira para uma simulação com duração de 12 horas é apresentada, resumidamente a cada hora, nas Figuras 1, 2 e 3. Nas primeiras quatro horas de simulação, este vento hipotético constante com velocidade de 15 m/s de origem sudoeste fez com que a água da parte sul fosse transferida para a região norte da lagoa. Assim, o nível da água na parte sul vai gradativamente decaindo, de forma que a lâmina d'água nas células mais rasas (região litorânea) chegue a valores baixos caracterizando uma região seca. Os vetores de velocidade são mais intensos na região litorânea, enquanto que na região pelágica foram encontrados valores de velocidade mais baixos. Nestas primeiras horas os vetores de velocidades seguem o sentido do vento.

A seqüência da simulação mostra que com a persistência do vento sudoeste a Lagoa Mangueira começa a apresentar zonas de recirculação na região pelágica da parte sul caracterizado por vórtices. Isto acontece, principalmente, devido ao *fetch* produzido por este vento criando novas bases de atração no sul da Lagoa Mangueira, fazendo com que a água transferida para a parte norte comece a retornar para a parte sul através da zona pelágica por efeito da gravidade. Reduzindo gradativamente a intensidade do vento sudoeste gradativamente e mudando o sentido do vento em  $180^\circ$  (sentido nordeste), a água da parte norte da Lagoa Mangueira começa a ser transferida para a parte sul.

Com a troca do sentido do vento as regiões secas, na parte sul, começam a serem novamente inundadas. De forma análoga ao vento sudoeste, com a passagem de um vento no sentido nordeste os vetores de velocidade são mais intensos na região litorânea, enquanto que na região pelágica as velocidades são mais baixas.

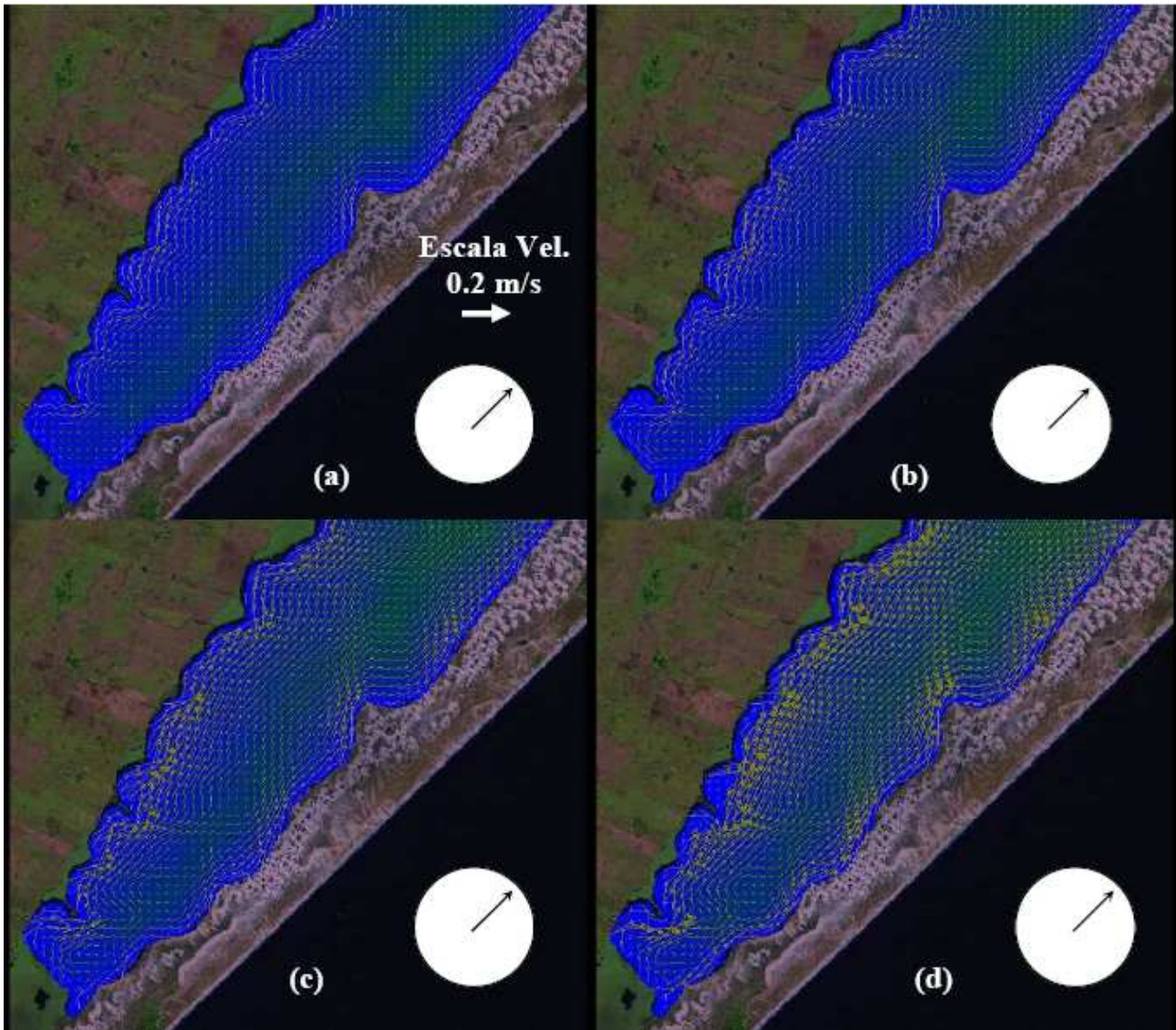


Figura 1 - Vetores de velocidade na parte sul da Lagoa Mangueira nas primeiras quatro horas de simulação aplicando um vento sudoeste de intensidade de 15 m/s.

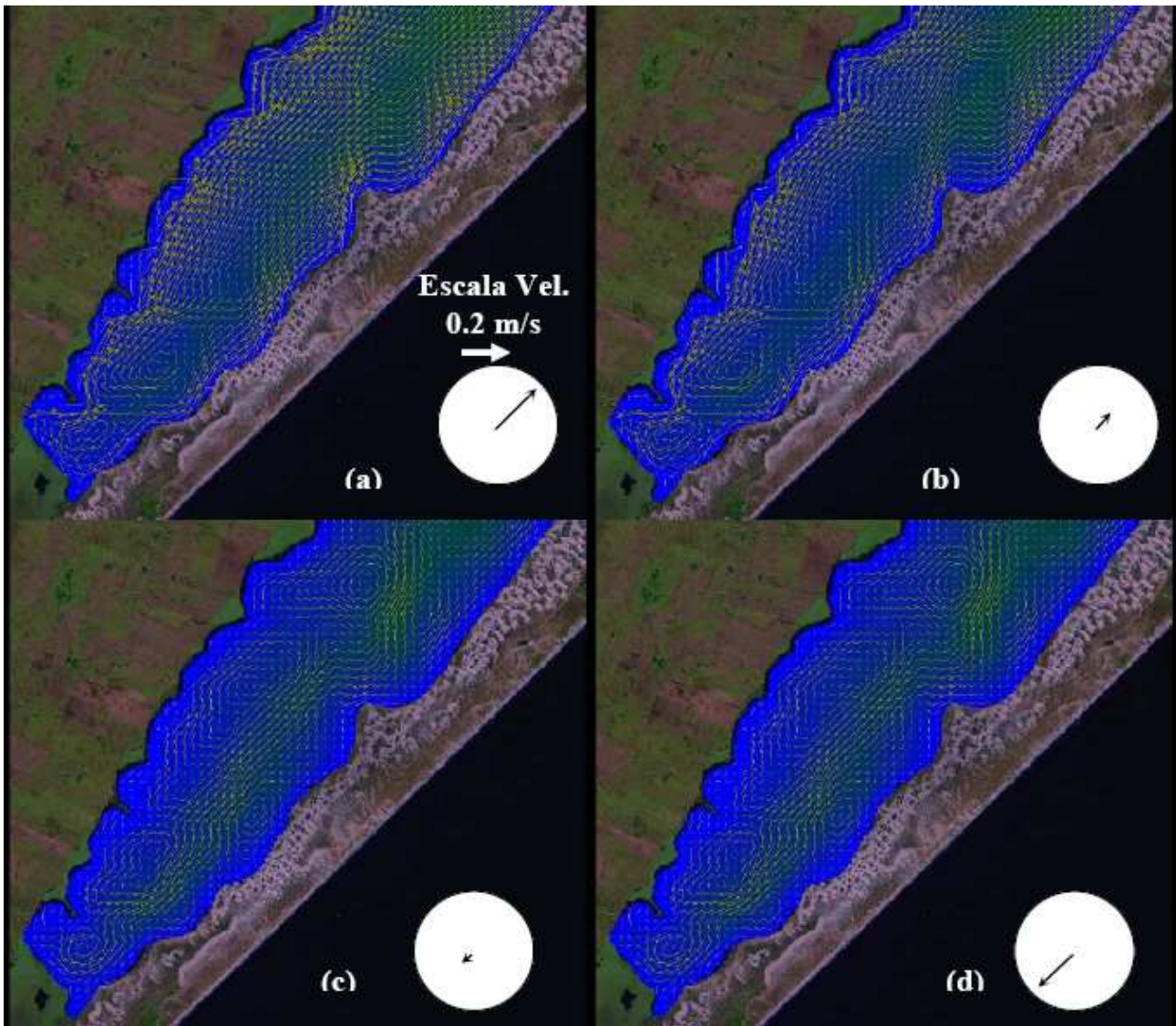


Figura 2 - Vetores de velocidade na parte sul da Lagoa Mangueira após (a) 5 horas, (b) 6 horas, (c) 7 horas, (d) 8 horas de simulação com uma mudança de vento sudoeste para vento nordeste.

A modelagem da transferência de material suspenso particulado do Banhado para a Lagoa Mangueira proporcionou uma melhor compreensão dos processos de circulação na parte norte da Lagoa Mangueira (Figura 4). Os quadros apresentados na Figura 4 representam seis campos instantâneos, entre o período de simulação, da configuração espacial do material suspenso particulado. Nesta simulação, é possível observar uma região que propicia a recirculação da água, formada pelo pontal de terra no contorno, referente a característica física do sistema, e a barreira de vegetação encontrada naquela região, devido a características biológicas (ver Figura 4a). Esta circulação ora pode está no sentido horário (Figura 4b) e ora no sentido anti-horário (Figuras 4c e 4d), dependendo da origem da formação do vento e sua intensidade. Ao final dos 26 dias de simulação, nota-se uma boa dispersão do material. Poucas partículas conseguem ser transportadas para a parte sul da Lagoa Mangueira (Figuras 4e e 4f) devido ao estrangulamento natural da lagoa pela formação dos pontais de terra.

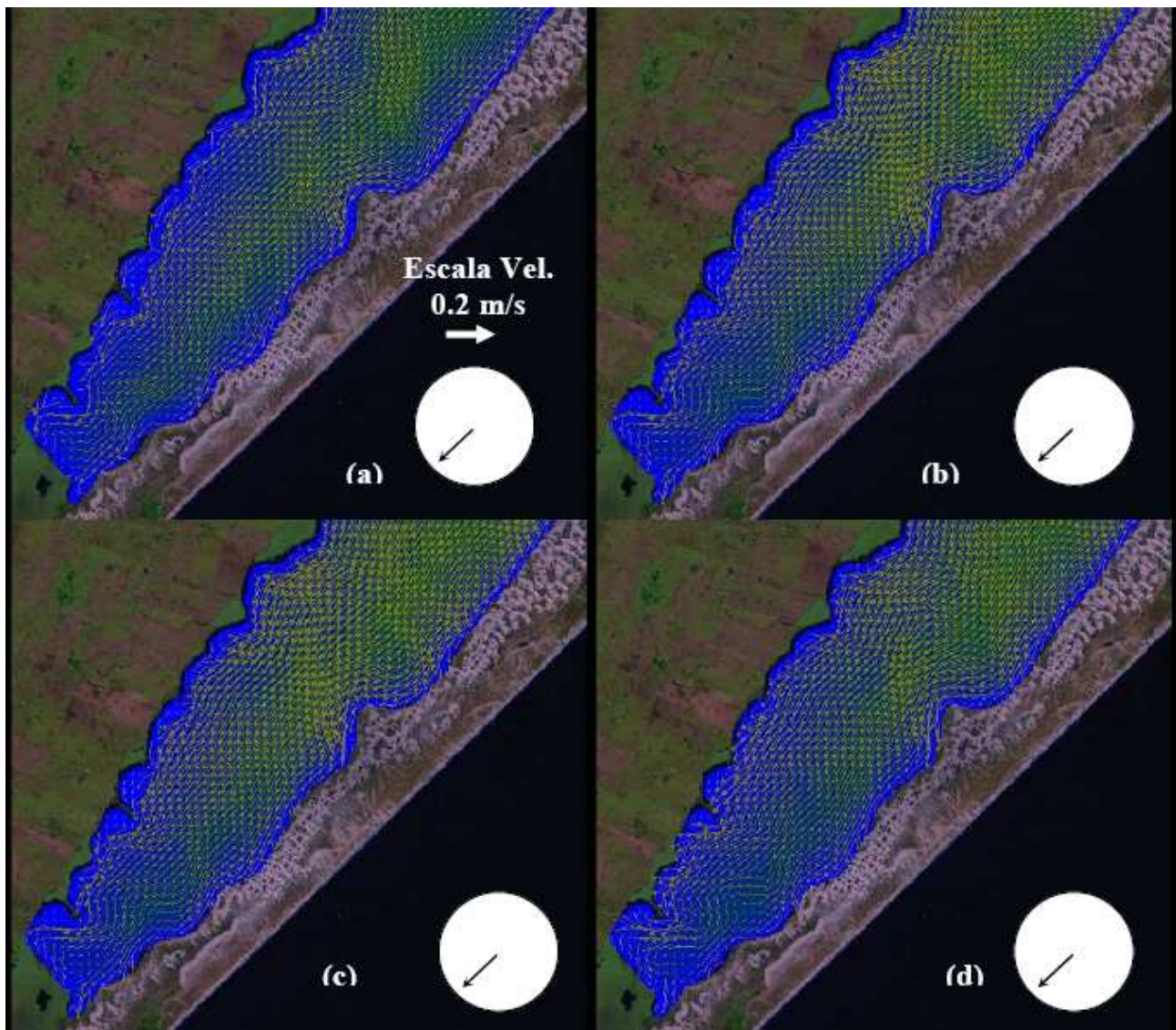


Figura 3 - Vetores de velocidade na parte sul da Lagoa Mangueira após (a) 9 horas, (b) 10 horas, (c) 11 horas, (d) 12 horas de simulação aplicando um vento sudoeste de intensidade de 15 m/s.

A modelação hidrodinâmica conjunta do Banhado do Taim com a Lagoa Mangueira mostrou uma transferência significativa de material do banhado para a Lagoa Mangueira e vice-versa, em função das condições hidrodinâmicas e meteorológicas. Contudo a maior parcela de material fica retida no Banhado do Taim, mostrando que este ecossistema é uma região em potencial para o armazenamento e tratamento biológico de matéria orgânica. Isto se dá devido as baixas velocidades encontradas no meio, decorrentes da exuberância em vegetação emergente de macrófitas aquáticas característica da região. Assim, o papel do banhado como modelador da matéria particulada e orgânica na Lagoa Mangueira, principal fonte de água para a produção em escala industrial de arroz na região, ficou evidenciado.

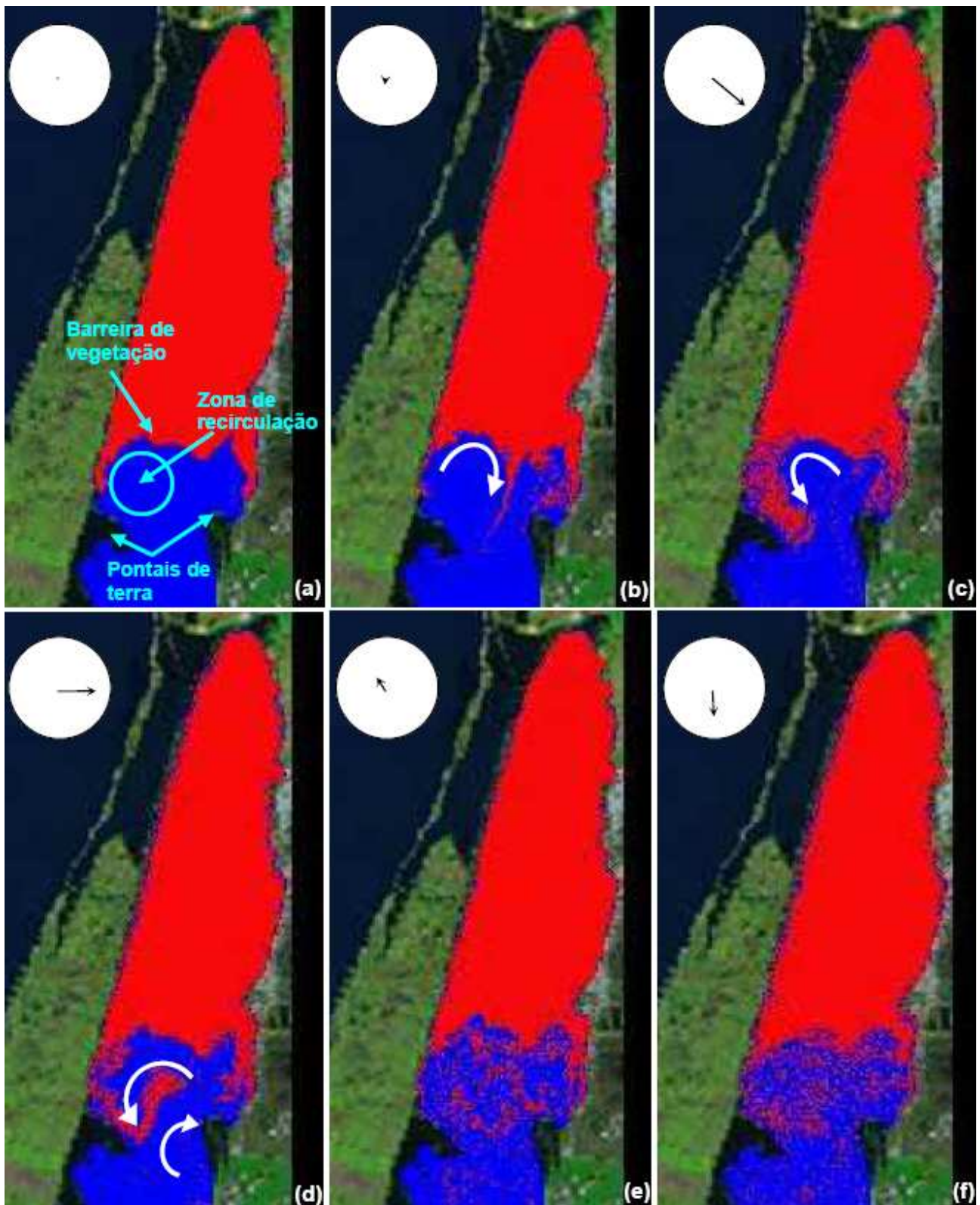


Figura 4 - Simulação da transferência de material suspenso particulado do Banhado do Taim para a Lagoa Mangueira, nos instantes: (a) 0 hora; (b) 80 horas; (c) 120 horas; (d) 130 horas; (e) 480 horas; (f) 600 horas. Em cada quadro é mostrada a direção e a intensidade do vento correspondente. Uma biruta, em cada quadro de simulação, indica a direção e a intensidade do vento.

A zona de recirculação é claramente observada na simulação do material suspenso na parte norte da Lagoa Mangueira, e pode ser constatada pela observação dos campos de velocidade nesta região (Figura 5). A aplicação de um vento sudoeste gera um vórtice na interface Lagoa-Banhado, o



qual pode ser suficiente para desprender materiais provenientes do Banhado do Taim, tais como matéria orgânica e nutrientes.

Figura 5 - Simulação dos campos de velocidade bidimensional na interface Lagoa Mangueira (parte norte) e Banhado do Taim devido ao vento no sentido sudoeste com intensidade de 15 m/s. Fonte: Paz (2003).

A simulação de transporte de um poluente é resumidamente ilustrada na Figura 6. Esta simulação tem o objetivo de compreender melhor os processos hidrodinâmicos na região central da Lagoa Mangueira. Os quadros da Figura 6 mostram a evolução do campo de concentração do escalar genérico ao longo da simulação. A Figura 6a apresenta o estágio inicial de simulação. Na seqüência, observa-se o transporte de material por difusão devido à ausência de vento (Figura 6b). A Figura 6c apresenta o campo de concentração do escalar genérico imediatamente após a primeira rajada de vento, com intensidade de 15 m/s, de origem sudoeste. Neste quadro de simulação, é possível observar o transporte por advecção da matéria. Ao longo das margens o escalar é transportado no mesmo sentido do vento, já no canal central, o fluxo é invertido e zonas de recirculações ficam evidentes devido a características geométricas do contorno (ver setas da Figura 6c). Ventos de origem nordeste (Figura 6d) resultam em padrões de transporte invertidos. Ao longo das margens, o escalar é conduzido para a direção sul da lagoa. No canal central o fluxo segue o mesmo sentido do vento (ver setas da Figura 6d). Na Figura 6f observa-se a difusão, mistura e transporte da matéria ao longo das margens e na região central da lagoa. Além disso, é possível perceber a preservação da matéria no sul da lagoa, indicando a consistência da resposta.

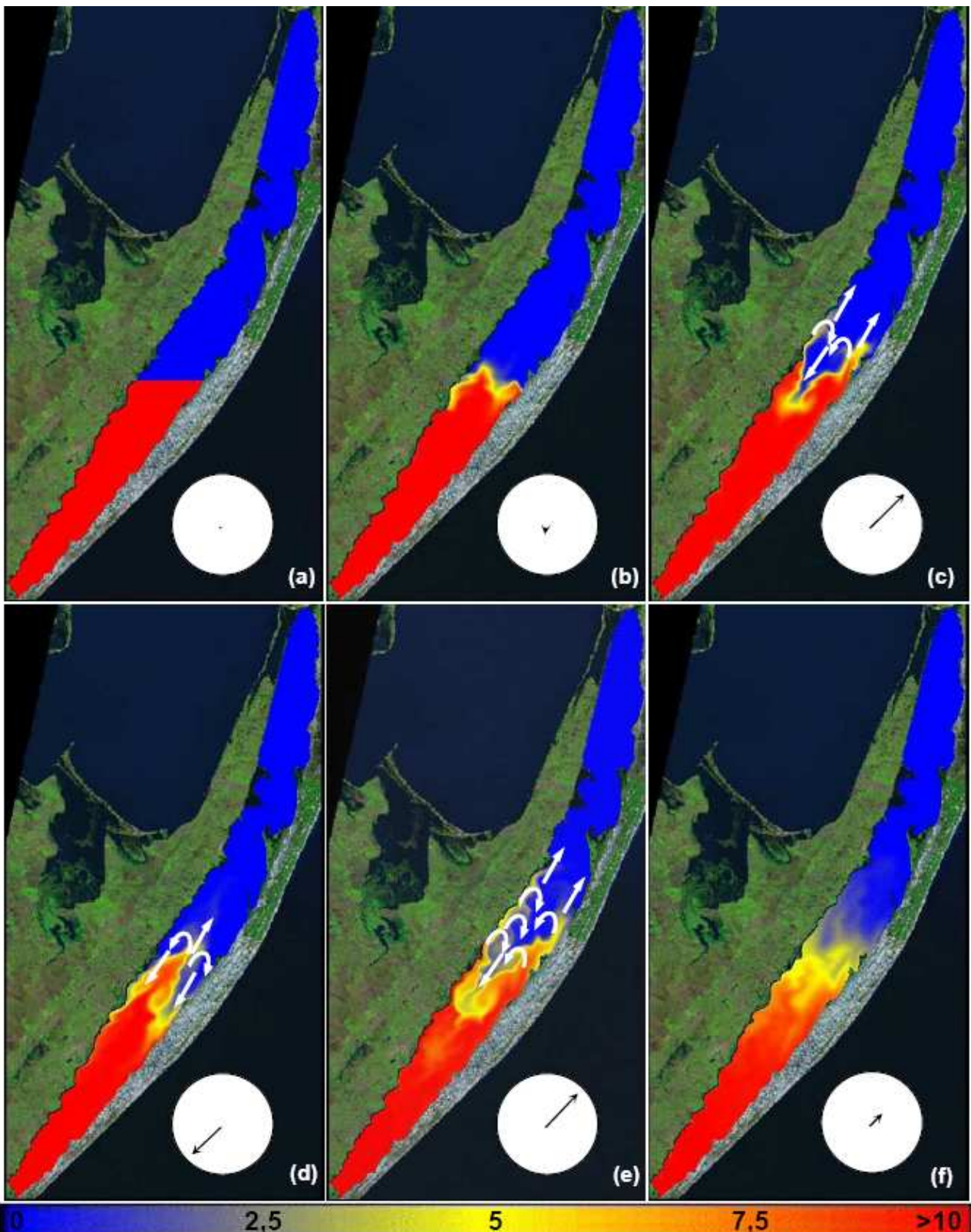


Figura 6 - Simulação do transporte de um poluente conservativo genérico no Sistema Hidrológico Taim, nos instantes: (a) 0 hora; (b) 100 horas; (c) 150 horas; (d) 252 horas; (e) 450 horas; (f) 550 horas. Em cada quadro é mostrada a direção e a intensidade do vento correspondente. Uma biruta, em cada quadro de simulação, indica a direção e a intensidade do vento.

## CONCLUSÕES

Este trabalho descreve brevemente o desenvolvimento de um modelo matemático hidrodinâmico, de transporte de sedimentos e nutrientes aplicado na Lagoa Mangueira no intuito de compreender melhor os processos hidrodinâmicos na parte sul, norte e centro deste ecossistema aquático.

Na parte sul da Lagoa Mangueira fluxos das águas acompanham, de maneira simplificada, a direção dos ventos predominantes encontrados naquela região (SO e NE). Os vetores de velocidade são mais intensos na região litorânea, enquanto que na região pelágica foram encontrados valores mais baixos de velocidade. Na interface da Lagoa Mangueira (parte norte) e Banhado do Taim são encontradas zonas de recirculação devido a formação de pontal de terra no contorno, referente a característica física do sistema, e a barreira de vegetação encontrada naquela região, devido a características biológicas. Estes padrões de circulação propiciam o desprendimento de material proveniente do Banhado do Taim, tais como matéria orgânica e nutriente. A circulação das águas na parte central da Lagoa Mangueira é caracterizada por padrões bem interessantes. Ao longo das margens o fluxo das águas segue o mesmo sentido do vento, enquanto que no canal central o fluxo é invertido e zonas de recirculações ficam evidentes devido a características geométricas do contorno. Os pontais de areia ao longo das margens propiciam o transporte de material da zona litorânea para a zona pelágica.

## BIBLIOGRAFIA

CASULLI, V. & CATTANI, E. (1994). “*Stability, accuracy and efficiency of a semi-implicit method for three-dimensional shallow water flow*”. Computers Math. Applic. 27(4): 99 – 112.

CASULLI, V. & CHENG, R. T. (1992). “*Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow*”. International Journal for Numerical Methods in Fluids. 15: 629 – 648.

CHAPRA, S.C. (1997). “*Surface water-quality modeling*”. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, 844 pp.

COUTINHO, P. N. (1986), “*Sugestões para gerenciamento de estuários*”. Arq. Ciên. Mar. Fortaleza, 77-86.

FRAGOSO JR., C. R. & 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. 152p.

FRAGOSO Jr, C.R. (2005). “*Simulações da Dinâmica de Fitoplâncton no Sistema Hidrológico do Taim*”. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 151p.

LOS, F.J. (1991). “*Mathematical simulation of algae blooms by the model bloom 2*”. Version 2, Documentation Report, Delft Hydraulics.

PAZ, A. R. (2003). “*Análise dos principais fatores intervenientes no comportamento hidrodinâmico do banhado do Taim (RS)*”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Porto Alegre. 155p.

SOUZA, R. C. & KJERVE, B. (1997). “*Fundamentos da Maré e sua Predição*”. XX Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional. Gramado/RS.