

# Simulação computacional do acidente com navio tanque Bahamas no porto de Rio Grande

Régis S. Pereira<sup>1</sup>, Luis Felipe H. Niencheski<sup>2</sup>, Marcelo A. Vitola<sup>3</sup>, Waldir T. Pinto<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Mestrando de Engenharia Oceânica – FURG, Rio Grande, RS – regissp@vetorial.net

<sup>2</sup> Departamento de Química – FURG, Rio Grande, RS – dqmhidro@furg.br

<sup>3</sup> Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS, Porto Alegre, RS – vitola@ppgiph.ufrgs.br

<sup>4</sup> Departamento de Materiais e Construção – FURG, Rio Grande, RS – w\_pinto@dmc.furg.br

**RESUMO:** Em agosto de 1998, o navio tanque Bahamas aportou em Rio Grande transportando ácido sulfúrico concentrado. Devido a problemas operacionais, a água inundou os tanques misturando-se com o ácido, produzindo uma mistura ácida, que em contato com o metal do navio gerou gases e risco de explosão. A alternativa encontrada foi permitir que o ácido fosse descarregado de forma controlada no canal do Porto. As simulações utilizando o modelo Delft3D foram feitas para condições semelhantes ao acidente (regime de vazante), nas quais o modelo apresentou resultados semelhantes ao observado, onde as altas descargas fizeram com que o ácido fosse carregado para o oceano. Quando foi aplicado o regime de enchente, o modelo mostra que o ácido ficaria na região espalhando-se para regiões interiores da lagoa. Portanto, se na época do acidente o regime fosse de enchente, o ácido poderia atingir regiões ecologicamente mais frágeis, trazendo graves prejuízos ao sistema.

**PALAVRAS-CHAVE:** Bahamas, acidente, estuário, modelo, Delft3D.

## 1. INTRODUÇÃO

Os modelos matemáticos e programas computacionais têm sido cada vez mais utilizados como agentes facilitadores no suporte à decisão entre alternativas de gestão e uso dos recursos hídricos [4, 6]. Os modelos matemáticos se propõem a explicar as causas e efeitos dos processos do ambiente, diferenciar as fontes antropogênicas das fontes naturais de poluentes, avaliar a eficiência de programas de gerenciamento ambientais, auxiliar em projetos e desenvolvimento de programas de amostragem de campo e no estudo em escala de bancada, determinar o tempo de recuperação de um corpo d'água após a implementação de um programa de redução de contaminantes ou de um acidente ambiental e, ainda a obtenção de resultados de cenários onde não é possível a obtenção de dados observados [11].

Tendo em vista as principais utilizações dos modelos matemáticos, estes poderiam ter sido utilizados como ferramenta auxiliar na tomada de decisões durante o incidente com o navio tanque Bahamas no Porto de Rio Grande, onde 12000 toneladas de ácido sulfúrico tiveram que ser descarregadas no canal de navegação, devido a problemas operacionais da

embarcação [9].

O trabalho a seguir, tem como objetivo a aplicação de um modelo matemático aos dados obtidos durante o acidente, verificando sua aplicabilidade e em seguida avaliar as consequências deste incidente em condições diferenciadas.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

O incidente ocorreu no terminal da empresa de fertilizantes Serrana AS (Latitude  $32^{\circ}03'035''$  S e Longitude  $52^{\circ}04'292''$  W, na proa do navio), localizado no canal do Porto de Rio Grande - RS, na região estuarina da Lagoa dos Patos. (Figura 1)

A Lagoa dos Patos tem uma superfície de  $10360\text{km}^2$ , sendo  $250\text{km}$  de comprimento e  $40\text{km}$  de largura e se comunica com o Oceano Atlântico por um estreito canal ao sul da lagoa. A circulação da lagoa depende principalmente de dois fatores: ventos e descarga fluvial. Ventos nordeste (NE), dominantes na região, forçam fluxos em direção ao mar (vazante). Ventos do quadrante sul, mais freqüentes nos meses de inverno, invertem esta situação (enchente) [8].

O incidente ocorreu no final do inverno, se perpetuando até o verão. O regime era de vazante, provocado pela forte descarga de água doce, devido a grande incidência de chuvas anteriores ao ocorrido. Nestas condições, o fluxo de água doce tendeu a se manter em direção do mar, mesmo com os ventos dominantes do tipo sudoeste (SW), característicos da época.



Figura 1: Localização da área de estudo

A lagoa drena uma bacia hidrográfica de quase 200000km<sup>2</sup>, que são caracterizadas pela alta descarga no inverno e primavera e baixa descarga durante o verão e outono. A média anual é em torno de 1000m<sup>3</sup>/s, e uma média sazonal de 700m<sup>3</sup>/s no verão e acima de 3000m<sup>3</sup>/s no inverno [3]. O pH normal da região estudada, por se tratar de um ambiente estuarino, se encontra geralmente entre 7 e 8,2 (neutro a levemente alcalino).

### **3. O INCIDENTE BAHAMAS**

Em 24 de agosto de 1998, o navio mercante Bahamas, destinado ao transporte de substâncias químicas perigosas, entrou no canal de acesso à Lagoa dos Patos (RS), transportando 19.613 toneladas de ácido sulfúrico concentrado, e atracou no terminal de uma indústria de fertilizantes, localizado no cais do Porto de Rio Grande (RS), a fim de descarregar parte deste ácido [10].

Devido a um equívoco operacional por parte da tripulação, ao manipular as válvulas reguladoras de fluxo do ácido sulfúrico, iniciou-se o vazamento deste ácido nas bombas de descarga, que inicialmente se estendeu pela sala de bombas da embarcação. Seguido de um segundo vazamento, desta vez da água de lastro do navio, o ácido foi diluído, aumentando o seu poder corrosivo e produzindo gases.

Após vários problemas com o navio, já em outro terminal, iniciou-se uma série de acontecimentos, que fizeram com que o ácido contido nos tanques e compartimentos da embarcação, interagisse com a água do canal, através de avarias na estrutura do navio, fazendo com que a embarcação encalhasse no próprio terminal. Em consequência das trocas ocorridas, houve a liberação de parte da mistura ácida ao meio hídrico circunvizinho, contendo metais pesados, indicadores da deterioração da estrutura metálica do navio, pelo processo de corrosão [2].

Medidas deveriam ser tomadas, pois enquanto acontecia o vazamento do ácido para o estuário, devido à oscilação da maré, somava-se o perigo de explosão, ocasionado pela produção de gás hidrogênio na parte interna dos tanques, em decorrência da reação exotérmica do ácido sulfúrico, com os metais presentes na estrutura do navio. A possível ocorrência da explosão na área portuária, resultou na decisão de liberação controlada das 12000 toneladas restantes da mistura ácida para o canal. Esta medida foi tomada consensualmente, por diversas autoridades locais presentes, que formaram uma comissão para a coordenação do incidente [2].

Sendo assim, a liberação do ácido foi fundamentada no fato de que mesmo não ocorrendo a explosão do navio, este ficaria por meses encalhado no terminal, e além de prejudicar o funcionamento do canal, geraria uma poluição maior e mais grave, devido à degradação descontrolada de toda a estrutura e conteúdo do navio, liberando todo o ácido, 230 toneladas de óleo e uma grande quantidade de metais pesados e outros materiais presentes [7].

Após a concentração de ácido sulfúrico no interior do navio ter diminuído, possibilitando o seu manuseio, foi proposto pela comissão, que este deveria ser transbordado para um outro navio, que pudesse transportar este tipo de carga até o alto-mar, e neste local, descartar a mistura [9].

Com o intuito de formular ações corretivas emergenciais, durante a maior parte do incidente, foi realizado um monitoramento contínuo das condições ambientais. Como resultado, dispõe-se de um histórico de dados, obtidos através de análises físico-químicas realizadas no período do incidente, envolvendo variáveis tais como o pH e a concentração de metais pesados. Estes dados foram obtidos da mistura ácida no interior do navio, nos diferentes compartimentos, e da água do estuário, em possíveis pontos afetados, ou se caso fossem, poderiam afetar a comunidade da região. Este estudo se desenvolveu até que o navio Bahamas não mais liberasse ácido ou metais pesados para o meio hídrico adjacente.

## **4. MODELO UTILIZADO**

Para este trabalho foi utilizado o módulo FLOW do sistema de modelagem integrado de fluxo e transporte da WL | Delft Hydraulics para ambientes aquáticos. O módulo FLOW é um modelo hidrodinâmico que possui a equação de transporte acoplada. Todas as condições hidrodinâmicas e de transporte são determinadas por este módulo, e os resultados podem ser utilizados como entrada para os demais módulos [5], como o de transporte de sedimentos, ecologia, ondas, morfologia e o de qualidade da água.

O módulo FLOW resolve as equações de águas rasas para estados não estacionários em 2 ou 3 dimensões. O sistema de equações consiste nas equações do movimento, continuidade e de transporte de substâncias conservativas. As equações são resolvidas pelo método de diferenças finitas.

Algumas das aplicações possíveis deste modelo são: a intrusão de sal em estuários, descarga de rios de água doce em baías, estratificação térmica em lagos e mares, transporte de materiais dissolvidos e poluentes, marés, marés meteorológicas e escoamentos de rios.

A disponibilidade do modelo e seu reconhecimento na avaliação ambiental de sistemas hídricos, foram decisivos para sua escolha.

### **4.1. Preparação do modelo**

A preparação do modelo do estuário da Lagoa dos Patos, começou com a criação da grade que representa computacionalmente a porção do ambiente a simular. O Delft3D dispõe do RGFGRID, um programa destinado à criação e manipulação de grades, que podem ser retangulares, esféricas ou curvilíneas [1]. De acordo com o apresentado na área de estudo, o ambiente a ser modelado possui um contorno muito irregular, não podendo ser representado por uma grade retangular ou esférica. Contornos irregulares podem levar a erros significativos na discretização. Para reduzir estes erros utilizou-se uma grade curvilínea.

Devido à dificuldade de determinar as condições de contorno no canal, foi modelado o estuário inteiro. Portanto, a área do estuário foi digitalizada e importada para o editor de grades e, de posse do contorno, foram utilizadas linhas de referência que se sobrepunham aos contornos do estuário. Essas linhas foram transformadas pelo programa numa grade grosseira, que foi sendo refinada até se obter uma resolução que permitisse uma reprodução dos processos de transporte o mais realista possível. A grade definitiva foi obtida após a aplicação

da batimetria do local (Figura 2).

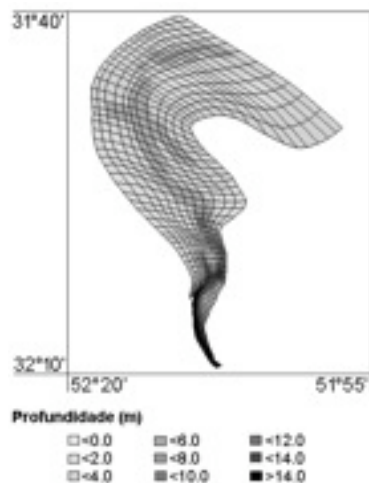


Figura 2: Grade utilizada para a simulação do incidente Bahamas.

Com a grade pronta, foram definidas para o modelo, fronteiras fechadas (margens da Lagoa) e as fronteiras abertas (limites norte e sul) (Figura 3). A fronteira norte, correspondente a ligação do estuário com a Lagoa, foi considerada como uma fronteira aberta, utilizando como forçante a descarga da Lagoa, a qual foi prescrita como uma série temporal. A fronteira sul consiste dos Molhes da Barra do Rio Grande. Nesta fronteira foi estabelecido como forçante o nível do mar, levando em conta uma maré lunar semidiurna com amplitude de 0,5m. As descargas do estuário da Lagoa dos Patos foram obtidas com a Agência Nacional de Águas. Os dados de maré foram fornecidos pela Capitania dos Portos da Marinha Brasileira, enquanto que a batimetria do local foi fornecida pelo Porto do Rio Grande.

A análise do incidente utilizando o Delft3D foi conduzida por um período de 15 dias divididos da seguinte maneira: 2 dias antes do início do derramamento, 11 dias de derramamento (02/09/1998 e 13/09/1998) e 2 dias após o fim do derramamento do ácido. O bombeamento do ácido para o canal foi feito de forma controlada. O ácido só era lançado quando a corrente era em direção ao mar, em caso contrário o bombeamento era interrompido. Isso fez com que durante os 11 dias de alijamento da carga tenham sido realizados 16 ciclos de derramamento de ácido, com diferentes tempos de duração (Tabela .)

Tabela 1: Resumo dos bombeamentos de ácido para o canal.

Data e horário do início dos bombeamentos		Data e horário do fim dos bombeamentos	
02/09/98	22:10	03/09/98	13:45
03/09/98	23:30	04/09/98	09:00
04/09/98	10:10	04/09/98	12:35
04/09/98	14:10	04/09/98	15:00
04/09/98	18:10	04/09/98	19:00
04/09/98	23:00	05/09/98	14:10
05/09/98	22:05	06/09/98	13:00
06/09/98	22:40	08/09/98	16:45
08/09/98	18:50	08/09/98	21:15

09/09/98	07:20	09/09/98	09:00
09/09/98	14:00	09/09/98	16:00
09/09/98	16:40	12/09/98	05:55
12/09/98	10:15	12/09/98	12:00
12/09/98	16:45	12/09/98	18:20
12/09/98	23:00	13/09/98	01:30
13/09/98	06:30	13/09/98	09:00

Para as simulações foram escolhidos 5 pontos de monitoramento dentro do modelo. Os pontos 2, 3 e 5 foram escolhidos para coincidir com os pontos de amostragem feitos pela FURG e os pontos 1 e 4 para controle do modelo (Figura 3). O modelo calcula a concentração de ácido sulfúrico e essa concentração foi transformada em pH para a comparação com dados obtidos durante o incidente.

Durante as simulações, considerou-se que se comportaria como uma substância conservativa, ou seja, não haveria interação dele com o meio de forma alguma, não havendo reações químicas nem decomposição biológica, somente poderia haver a diluição ou concentração dele no sistema.

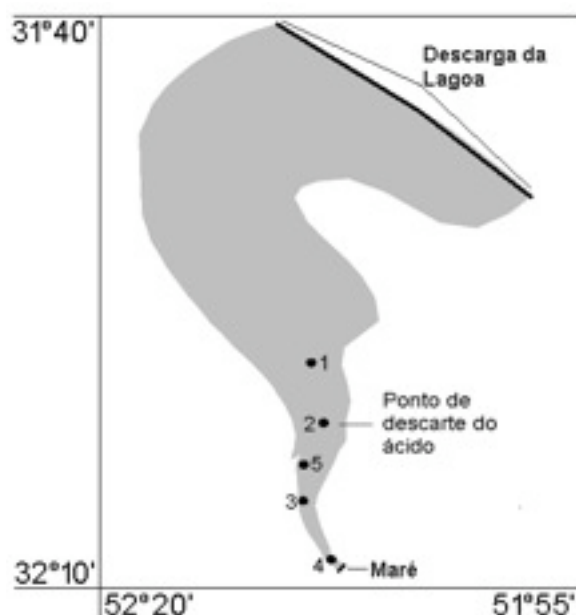


Figura 3: Localização das condições de contorno e dos pontos de observação do modelo.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da descarga do ácido utilizando o modelo foi dividida em duas partes: a) validação do modelo, onde foram utilizados os dados obtidos durante o acidente a fim de verificar a aplicabilidade do modelo; b) aplicação do modelo validado para estudo do acidente em condições diferenciadas.

### 5.1. Validação do modelo

O modelo FLOW foi validado comparando os dados obtidos do monitoramento durante o acidente com os resultados da simulação. Para a validação foram utilizadas as mesmas condições observadas durante o acidente, descarga da lagoa de 5000m<sup>3</sup>/s, ventos de sudoeste (1 a 2m/s) e vazão de bombeamento do ácido de 0,05 m<sup>3</sup>/s.

Para estas condições, percebeu-se que os resultados das simulações foram muito próximos aos valores reais (Figura 4), o que evidencia que o modelo foi validado com sucesso, pois representou bem a situação física ao qual foi submetido.

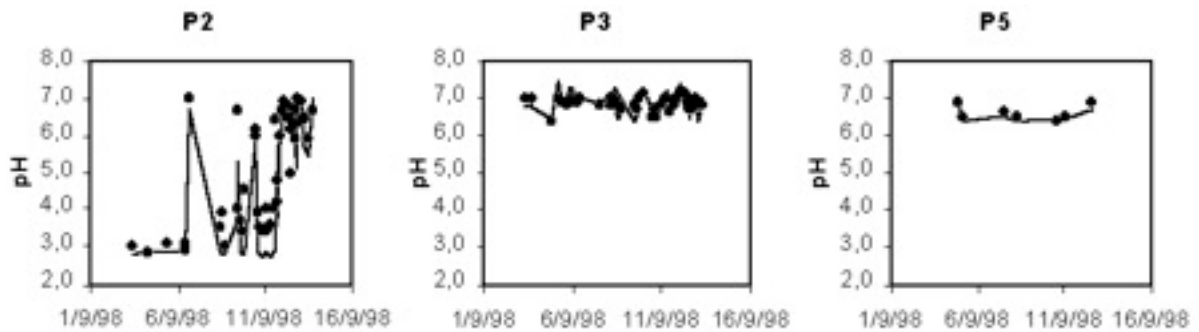


Figura 4: Comparação entre valores observados (pontos) e valores simulados (linha) de pH.

O descarregamento do ácido no canal foi feito numa época que havia sido constatado alto índice pluviométrico nas bacias que formam a rede de drenagem da Lagoa dos Patos, fazendo com que o regime de vazante fosse muito intenso. Segundo o observado nas Figuras 5a e 5b logo que o ácido é descartado ele toma a direção do oceano e 11h após cessar o derramamento a concentração no ponto de lançamento atinge níveis normais novamente, conforme a Figura 5c. O regime de altas vazões (5000 m<sup>3</sup>/s) fez com que a diluição do contaminante fosse rápida.

A consideração feita no estudo de que o ácido é uma substância conservativa foi comprovada, pois devido às altas vazões o ácido teve um tempo de residência muito baixo dentro do estuário que combinado com as baixas concentrações devido à diluição fizeram com que o ambiente pouco se alterasse.

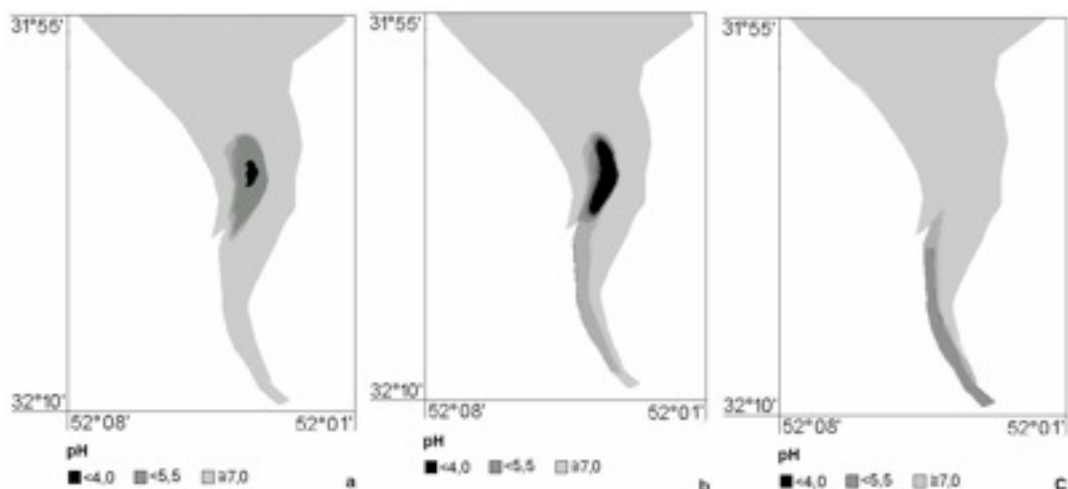


Figura 5: Dispersão característica do ácido após cada ciclo de descarregamento.

## 5.2. Regime de enchente

Aplicando ao modelo uma descarga de  $1500\text{m}^3/\text{s}$  e ventos de sudoeste (3 a  $5\text{m/s}$ ), obteve-se o regime de enchente no estuário, condição contrária à observada durante o incidente. Nestas condições percebe-se que a diluição na região do acidente é muito pequena, e que ácido tende a se espalhar para áreas mais internas do estuário (Figura 6a). Quando é interrompido o descarregamento do ácido, as simulações demonstraram que haveria diluição das concentrações do contaminante somente de acordo com a oscilação da maré. Nas marés baixas o ácido seria levado em direção ao oceano e trazido de volta na maré alta com concentrações mais baixas (Figura 6b).

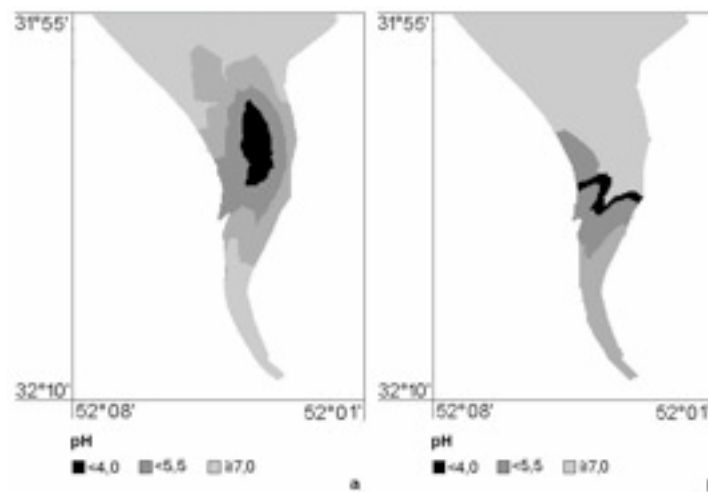


Figura 6: Previsão das concentrações do ácido no estuário em regime de enchente.

Comparando o pH no ponto mais interno do estuário (ponto 1) nas duas condições estudadas, percebe-se que o pH nessa região não é influenciado pelo derramamento, em regime de vazante. Enquanto que para o regime de enchente o pH pode chegar aproximadamente a 5,5 neste local (Figura 7).

Apesar de danos ao ambiente terem acontecido [7], estes foram os menores possíveis. As simulações confirmam a afirmação de Niencheski [9], que “graves prejuízos ao sistema poderiam ter ocorrido, se na época o regime fosse de enchente, pois o ácido teria atingido áreas de berçários, assim como promoveria uma possível solubilização dos metais do ambiente, tornando-os biodisponíveis”.



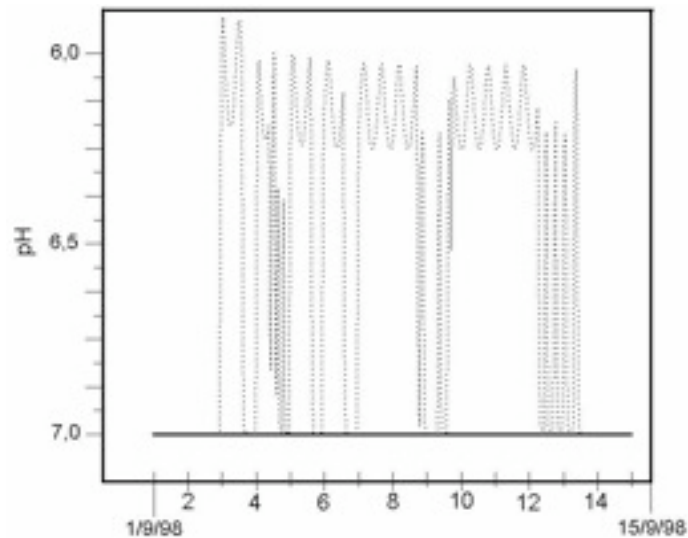


Figura 7: Comportamento do pH no ponto 1 de observação em regime de vazante (linha cheia) e regime de enchente (linha tracejada).

## 6. CONCLUSÕES

Caso o incidente tivesse ocorrido numa época em que o regime fosse de enchente, o contaminante poderia ter entrado em contato com porções mais interiores do estuário, ecologicamente mais frágeis, deteriorando o ambiente com graves conseqüências ao ecossistema existente.

O modelo se mostrou aplicável para avaliação do incidente com o navio Bahamas, e portanto, poderia se tornar uma ferramenta de suporte a decisão em casos semelhantes. Já que o sistema de gerenciamento costeiro da região se mostrou frágil.

De acordo com os resultados obtidos percebe-se que a decisão de alijamento da carga ácida do navio tanque para o estuário foi a decisão mais correta ambientalmente, tendo em vista que o acidente com o Bahamas ocasionou um efeito muito mais social do que ambiental.

## REFERÊNCIAS

1. Delft3D, FLOW, *User Guide* 1999. 180p.
2. FONSECA, V. V. *Incidente com o Navio Tanque Bahamas: avaliação qualitativa e quantitativa dos efeitos físico-químicos imediatos na região sul do estuário da Lagoa dos Patos*. 2002. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2002.

3. HERZ, R. *Circulação da águas de superfície da Lagoa dos Patos*. 1977. 722f. Tese (Doutorado em Oceanografia) - Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas. Departamento de Geografia. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1977.
4. LUCA, S. J. *Simulação de qualidade de água em bacias hidrográficas com aproveitamentos hidroelétricos em cascata*. IN: Edital CT-HIDRO 01/2001. 2001.
5. LUIJENDIJK, A. P. *Validation, calibration and evaluation of Delft3D-FLOW model with ferry measurements*. 2001. 92p. Dissertação (Mestrado) - Delft Hydraulics University, Delft, 2001.
6. MENDONÇA, A. S. F. *Desenvolvimento de sistema de suporte à decisão para subsídio à outorga de uso de água de rios, lagos e reservatórios considerando fontes pontuais e difusas*. IN: Edital CT-HIDRO 01/2001. 2001.
7. MIRLEAN, N.; NIENCHESKI, L. F.; BESNICK, B.; BAUMGARTEN, M. G. The Effect of Accidental Sulfuric Acid Leaking on Metal Distributions in Estuarine Sediment of Patos Lagoon. *Marine Pollution Bulletin*. v.42, n.11, p. 1114-1117, 2001.
8. MOLLER, O. J. *Hydrodynamique de la Lagune dos Patos (30°S Brésil): mesures et modélisation*. 1996. 199f. Tese (Doutorado em Oceanografia) - L'Université Bourdeaux, Bourdeaux, 1996.
9. NIENCHESKI, L. F.; BAUMGARTEN, M. G.; BESNICK, B.; BERNADELLI, H. C. O incidente com o navio Bahamas, carregado de ácido sulfúrico no porto da cidade de Rio Grande (RS): sua inundação e remoção. *Revista pesquisa Naval*. v.14, 197-207, 2001.
10. NIENCHESKI, L. F.; BESNICK, B.; BAUMGARTEN, M. G. Avaliação da qualidade hídrica. IN: ASMUS, L. M.; TAGLIANI, R. B. *Monitoramento emergencial dos efeitos do derramamento do ácido do navio Bahamas no estuário da Lagoa dos Patos: Relatório Técnico*. Rio Grande: FURG, 1998. 58 - 68p.
11. PEREIRA, R. S. *Processos que regem a qualidade da água da Lagoa dos Patos, segundo o modelo Delft3D*. 2003. 149p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Fundação Universidade Federal do Rio Grande, 2003.