

ESTUDOS DE CIRCULAÇÃO D'ÁGUA E DE DISPERSÃO DE POLUENTES NO COMPLEXO LAGUNAR SUL DE SANTA CATARINA

B. M. Vargas¹, P. C. da S. Freire¹, D. Accetta¹, T. Uhrenholdt² e J. C. C. Amorim³

Resumo – Este trabalho apresenta os estudos, por modelagem matemática, realizados para avaliar a penetração das águas do rio Tubarão na lagoa do Imarui e a influência do aterro no canal de Laranjeiras sobre a circulação d'água nessa lagoa. No estudo de circulação d'água, simulou-se a situação atual do aterro existente entre as margens do canal de Laranjeiras e uma situação extrema, em que esse aterro é totalmente removido. Na modelagem matemática foi utilizado o software MIKE 21, com os seus módulos HD (hidrodinâmico) e AD (advecção-dispersão), desenvolvido pelo DHI. A base de dados usada na modelagem matemática foi obtida pelo INPH, durante as ações do Programa PROVIDA.

Abstract - This paper presents a study, by means of mathematical modelling, to assess the intrusion of the Tubarão river water into the Imarui lagoon and the influence of the Laranjeiras landfill on the water exchange of the Imaruí lagoon. Included in this objective was a task of investigating the effects of the construction of a number of so-called galleries in the landfill. The objective was investigated by means of the MIKE 21 HD (hydrodynamic module) and AD (advection-dispersion module) models. The data basis of the modelling study consists of two field campaigns and long term monitoring performed by INPH in the framework of the PROVIDA programme.

Palavras-chave – circulação d'água, modelo hidrodinâmico, advecção-dispersão, modelagem matemática.

¹ INPH – Instituto de Pesquisas Hidroviárias, Rua General Gurjão, 166, 20931-040, Rio de Janeiro – RJ, tel.: (21) 2580-8081, fax: (21) 2580-4914, E-mail: inph@antares.com.br.

² DHI – Danish Hydraulic Institute, Agern Allé 5, DK-2970, Horsholm, Dinamarca, tel.: (45) 45769555, fax: (45) 45762567, E-mail: thu@dhi.dk

³ IME – Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Rio de Janeiro – RJ, tel.: (21) 2546-7026, fax: (21) 2546-7029, E-mail: jcamorim@ime.eb.br

Caracterização do Estudo

As Lagoas de Santo Antônio, do Imarui e Mirim fazem parte de uma série de lagoas costeiras localizadas ao redor (N, NW e SW) da cidade de Laguna, em Santa Catarina. Interligadas entre si, natural ou artificialmente, essas lagoas costeiras compõem o chamado Complexo Lagunar da Região Sul-Catarinense, que abrange uma área de aproximadamente 220 km², e é composto pelas seguintes lagoas: Santo Antônio, do Imarui, Mirim, Santa Marta, Camacho, Garopaba do Sul, Manteiga e Ribeirão Preto. As famílias que ali residem têm como principal fonte de renda a atividade turística e a pesca do camarão.

No presente estudo foram desenvolvidos estudos sobre o aumento da troca de água entre a Lagoa do Imarui e a Santo Antônio, simulando a situação atual e com a remoção do aterro no canal de Laranjeiras, visando melhorar a circulação d'água no complexo lagunar.

Os estudos aqui apresentados foram realizados sob a coordenação do Grupo de Pesquisa em Hidráulica e Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia de Fortificação e Construção do IME, em parceria com o INPH – Instituto de Pesquisas Hidroviárias e o DHI – Danish Hydraulic Institute.

Objetivos

O presente trabalho teve por objetivos a aplicação de modelos matemáticos destinados ao estudo da circulação d'água no complexo lagunar sul de Santa Catarina. Em uma primeira etapa os estudos tiveram por objetivo avaliar o grau de penetração das águas do rio Tubarão no interior da lagoa do Imarui e a influencia do aterro no canal de Laranjeiras sobre a circulação das águas naquela lagoa. Incluída neste objetivo estava investigar a viabilidade de remover parcialmente ou totalmente o aterro existente para melhorar a circulação d'água entre as lagoas

Base de Dados para o Modelo Matemático

A base de dados usada na modelagem matemática foi as duas campanhas de campo realizadas pelo INPH no sistema lagunar da região sul-catarinense em 1992 e em 1993, dentro das ações do programa PROVIDA (INPH, 1994).

Batimetria

A Figura 1 mostra a batimetria que foi empregada no modelo matemático para a situação atual. Essa batimetria foi gerada a partir das plantas CDRJ / INPH 284-11, 284-12, 284-13, 284-14 e 284-15H, na escala de 1:10.000, e referidas ao Zero do IBGE. O espaçamento adotado para os nós da malha foi de 50 m.

Níveis d'água

Os níveis d'água foram medidos continuamente nas estações maregráficas do Porto de Laguna, do Bananal, do Perrixil e do Mirim. A Figura 2 mostra uma comparação entre os níveis d'água medidos nessas quatro estações para um dos períodos de tempo abrangidos pelos estudos do

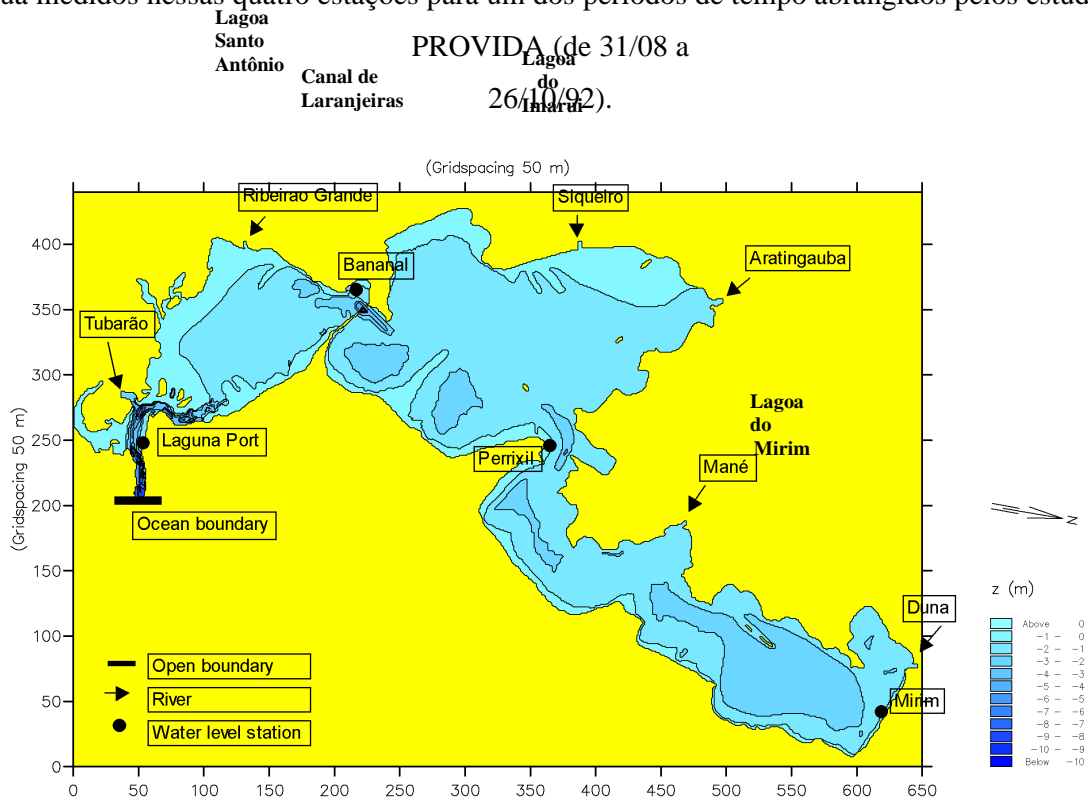


Figura 1 - Batimetria atual, indicando a localização das estações maregráficas, dos rios e do contorno aberto (mar).

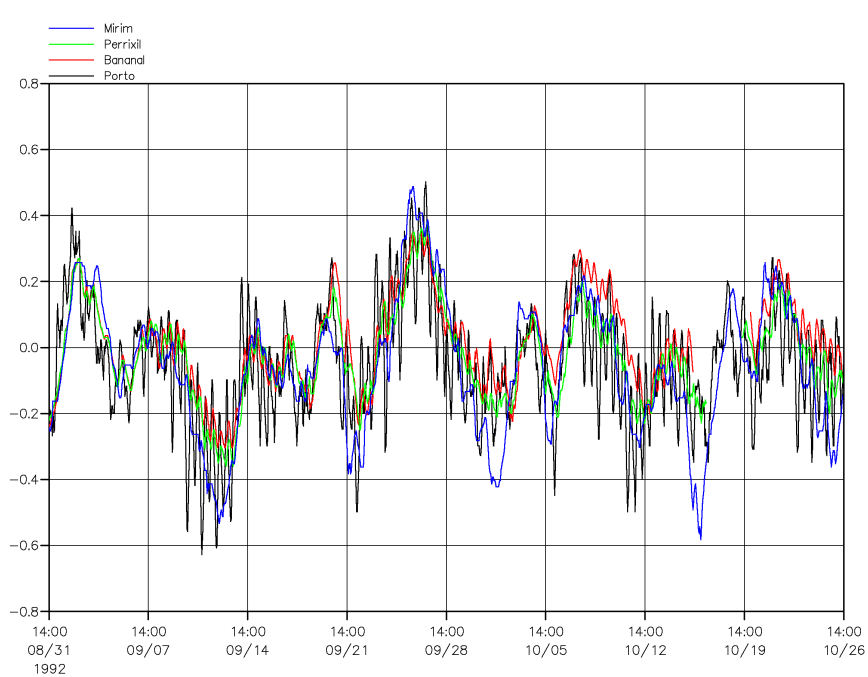
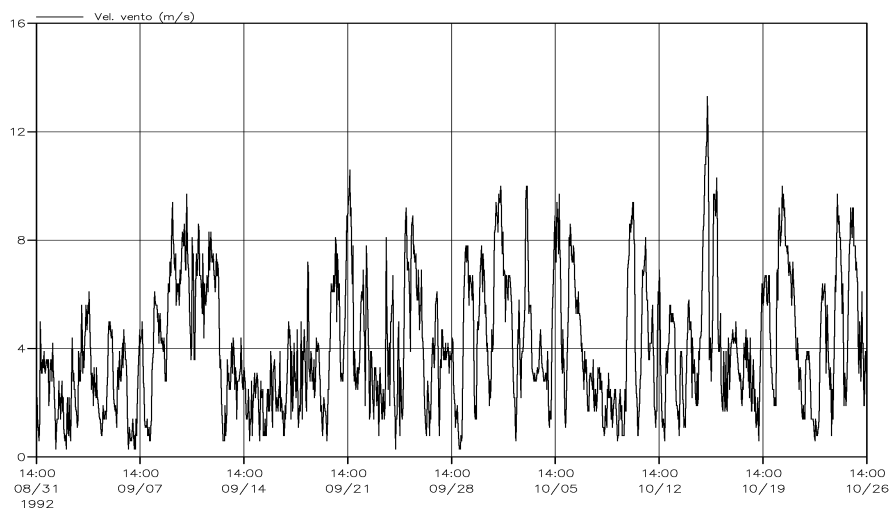


Figura 2 - Comparação entre os níveis d'água (em metros) medidos nas 4 estações maregráficas

Ventos

As velocidades e as direções dos ventos foram medidas continuamente na estação anemográfica do Perrixil. A Figura 3 mostra os valores usados nas simulações.



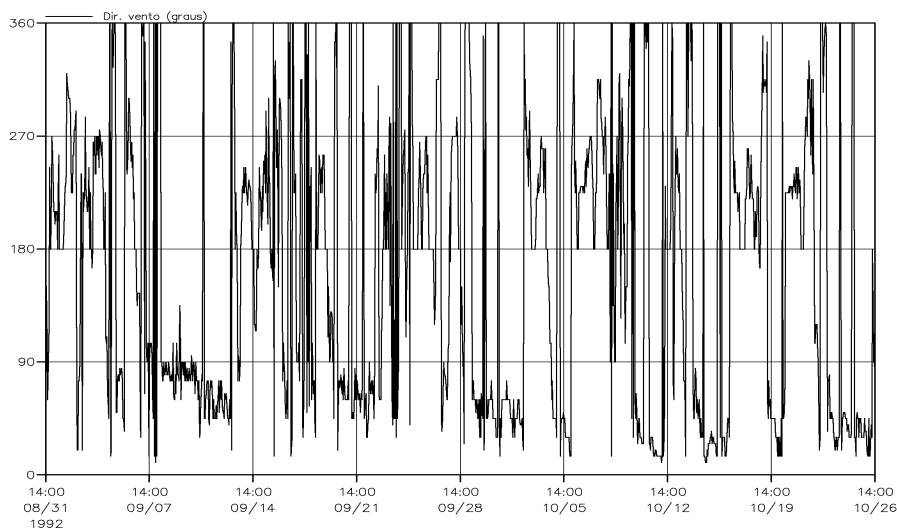


Figura 3 - Dados de ventos da estação anemográfica do Perrixil

Modelagem Matemática

Modelagem Hidrodinâmica

A modelagem hidrodinâmica do sistema lagunar lagoa Santo Antônio – lagoa do Imarui – lagoa do Mirim é necessária para atender os objetivos, pois é ela quem vai fornecer as velocidades das correntes que irão alimentar os outros modelos.

Para simular os níveis d’água e as velocidades das correntes nas lagoas Santo Antônio, do Imarui e do Mirim, foi proposto o emprego de um modelo bidimensional integrado na vertical, apoiado no fato de que essas lagoas são rasas (profundidade média de 1,7 a 1,8 m) e sem estratificação.

Como a circulação d’água nas lagoas é governada pela maré, pelos ventos (maré meteorológica) e pelas contribuições fluviais, a modelagem hidrodinâmica foi feita com o módulo HD do software MIKE 21, um dos mais sofisticados sistemas computacionais da atualidade para a modelagem bidimensional (2D) de escoamentos de superfície livre em corpos d’água onde a estratificação do meio pode ser negligenciada. Desenvolvido pelo DHI - Danish Hydraulic Institute, o MIKE 21 é aplicável em simulações de fenômenos hidráulicos e ambientais em lagos, estuários, baías, áreas costeiras e mares, em que se possa desprezar a estratificação. O MIKE 21 HD emprega na sua formulação as equações, dependentes do tempo, da continuidade e da conservação da quantidade de movimento em x e em y (plano horizontal). Obtém-se a solução utilizando-se um esquema implícito ADI de diferenças finitas, com precisão de segunda ordem. O módulo HD do

MIKE 21 simula as variações de nível d'água e de escoamento, em resposta a uma variedade de forças governantes. Os níveis d'água e escoamentos são analisados nos pontos de uma malha retangular que cobre a área de interesse, desde que se conheçam a batimetria, os coeficientes de atrito no fundo, os campos de ventos, as condições geográficas de contorno, etc.

Para a calibração e a validação do modelo hidrodinâmico foram empregados os dados de campo apresentados no item anterior, levantados para essas lagoas durante o período de 1992 a 1993, dentro das ações de curto prazo desenvolvidas pelo Governo de Santa Catarina para o Projeto PROVIDA.

As plantas batimétricas das lagoas foram digitalizadas e passadas para meio magnético, para serem utilizadas no programa de geração da malha batimétrica para o MIKE 21 HD. Os dados de marés, ventos, níveis d'água, etc. foram analisados e os conjuntos escolhidos passados para um formato de leitura que pode ser facilmente acessado pelo modelo matemático.

Modelo de Advecção-Dispersão

O modelo sugerido para aplicação neste caso é o MIKE 21 AD (modelo bidimensional de advecção-dispersão). Esse modelo pode simular o espalhamento de uma substância que esteja dissolvida ou que esteja em suspensão no meio aquático, sob a influência do transporte fluido e da dispersão a ele associada. O parâmetro pode ser sal, calor, ou algum tipo de contaminante, que tanto pode estar dissolvido como em suspensão no meio aquático. A substância pode ser tratada como conservativa, ou então como estando sujeita a um decaimento linear. O modelo AD está baseado no modelo HD, de modo que as malhas computacionais e os períodos das simulações foram os mesmos.

As equações do modelo AD são resolvidas por intermédio de um esquema de diferenças finitas ULTIMATE QUICKEST, com precisão de terceira ordem. Esse esquema evita os famosos problemas existentes nos modelos AD, no que tange ao equilíbrio de massa, à ultrapassagem de limites ou ao não alcance dos limites.

Com o modelo de dispersão-advecção puderam ser avaliados o espalhamento, a diluição e o tempo de retenção dos poluentes que forem selecionados. Esses poluentes tanto podem ser reais (ex: sal, coliformes fecais, etc.), como podem ser traçadores artificiais, idealizados para o propósito do estudo.

Os parâmetros de calibração do modelo AD são os coeficientes de dispersão. A calibração e a validação do modelo será feita com os dados disponíveis das concentrações de sal e de outros poluentes nas lagoas.

Fundamentos do Modelo Hidrodinâmico

O MIKE 21 HD é um modelo bastante geral, que tem como características principais não possuir contornos fixos, ou seja, ele pode modelar o escoamento em áreas que por vezes ficam alagadas e por vezes secas, bem como pode modelar escoamentos onde se utilizem altos números de Courant sem perda de estabilidade.

O modelo emprega na sua formação as equações de conservação de massa (continuidade) e de conservação da quantidade de movimento, dadas por:

Continuidade:

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

Conservação da Quantidade de Movimento em x:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \\ - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial x} \right] - \Omega q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial(p_a)}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Conservação da Quantidade de Movimento em y:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \\ - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial x} \right] - \Omega p - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial(p_a)}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

onde:

H (x,y,t) - profundidade

ζ (x,y,t) - elevação da superfície livre

p,q, (x,y,t) - densidade do escoamento nas direções x e y

C (x,y) - coeficiente de Chezy

g - aceleração da gravidade

f (V) - fator de atrito do vento

$V, V_x, V_y (x,y,t)$ - velocidade do vento e de suas componentes nas direções x e y

$\Omega (x,y)$ - parâmetro de Coriolis

$p_a (x,y,t)$ - pressão atmosférica

ρ_w – massa específica da água

x,y - coordenadas espaciais

t - tempo

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ - componentes da tensão de cisalhamento

Preparação e Calibração dos Modelos MIKE 21 HD e AD

A área do modelo matemático foi escolhida de modo que a saída do sistema lagunar formasse o contorno relativo ao oceano. A orientação da malha batimétrica usada nos modelos matemáticos foi escolhida para permitir que o contorno aberto do modelo (mar) ficasse paralelo ao eixo x. Já o tamanho das células computacionais foi escolhido para propiciar uma resolução adequada dos canais de ligação existentes entre as lagoas e entre essas e o mar. Adotou-se um espaçamento de 50 m entre os pontos da malha. A Figura 1 exibe a batimetria e a área escolhida para o modelo.

Tabela 1 - Principais características da malha batimétrica

Dimensões da Malha	650 x 440
Tamanho da Célula	50 m
Dimensões Geográficas	32,5 x 22,0 km ²
Origem	
- Latitude	28,50° S
- Longitude	48,65° W
Orientação	260 graus

Os modelos HD e AD são rodados simultaneamente, uma vez que o AD precisa dos resultados do HD como dados de entrada para o modelo.

O intervalo de tempo adotado nas simulações, o qual mantém uma relação íntima com o tamanho da célula, é de 30 segundos, conduzindo a um número máximo de Courant igual a 6,4. Por razões de estabilidade não foi possível aumentar esse valor.

As condições iniciais do Modelo HD são um nível d'água constante e fluxos (velocidades) iguais a zero. Este é o conhecido “início frio”, implicando que o modelo necessite de alguns dias para “esquentar”, antes que se possa utilizar os resultados. O nível d'água inicial depende do

horário do começo da simulação, pois o nível d'água inicial dentro do modelo e o nível d'água inicial no contorno aberto devem ser consistentes.

As condições de contorno no oceano, que é o único contorno aberto do modelo, são os níveis d'água medidos no Porto de Laguna. Tais níveis incluem as marés astronômica e meteorológica (induzida pelos sistemas climáticos regionais). Os rios são incluídos no modelo por intermédio de fontes do modelo, que levam em consideração tanto a massa (descarga) quanto a quantidade de movimento (velocidade) da água dos rios.

Além da fronteira aberta e dos rios, o Modelo HD leva em conta os ventos locais medidos em Perrixil. Os ventos locais atuam de modo a inclinar a superfície da água, induzindo, assim, correntes locais.

O Modelo AD tem que ser alimentado com dados de concentrações nos contornos abertos (o contorno relativo ao oceano), em fontes (rios) e dentro da área do modelo, que representam condições iniciais correspondentes a cada componente AD sendo simulada. Além disso, o módulo permite a especificação de um coeficiente de decaimento constante para cada componente AD.

A direção e a intensidade das correntes variam com a profundidade. O vento pode induzir fortes correntes na camada superficial, além de possuir efeito significativo sobre o arraste superficial. As correntes integradas na vertical, calculadas por intermédio do Módulo HD, devem, portanto, ser modificadas com relação à influência do vento. Isso se faz calculando-se a trajetória como uma soma vertical das correntes induzidas pelo vento (vetor de arraste pelo vento).

O coeficiente de atrito é um fator de proporcionalidade entre a velocidade do vento e o vetor de arraste pelo vento. Devido à influência da força de Coriolis, a direção do vento e a isso se dá o nome de ângulo de deflexão.

Uma vez definidos e preparados todos os dados necessários para o modelo matemático, pode-se iniciar o processo de calibração. Os períodos de tempo usados na calibração e na validação dos modelos são:

- calibração (primavera): 31/8/92 14:00 horas – 28/9/92 14:00 horas;
- validação (outono): 15/3/93 9:00 horas – 12/4/93 9:00.horas

A Tabela 2 apresenta os principais parâmetros utilizados para a calibração, que são os coeficientes de atrito no fundo (número de Manning), a viscosidade turbulenta e o coeficiente de atrito do vento.

Tabela 2 - Parâmetros de calibração do modelo hidrodinâmico

Número de Manning	20-60 m ^{1/3} /s
Viscosidade turbulenta	5 m ² /s
Coefficiente de atrito do vento	0,0026

As Figuras 4 a e b exibem a comparação entre os níveis d'água simulados e medidos nas quatro estações. Observa-se que a concordância geral é boa, tanto para o período de calibração quanto para o de validação, confirmando, assim, a capacidade do modelo de simular satisfatoriamente os níveis d'água. No período de 16-23/3/93, a estação maregráfica do Mirim apresentou um desvio sistemático de 15 cm entre os níveis d'água medido e simulado. Acredita-se que isso se deva a um erro na referência de nível (datum) nos níveis d'água medidos.

Como o modelo simula corretamente os níveis d'água, pode-se admitir que ele também simule o movimento geral e, portanto, corretamente os fluxos, tornando-o válido para a estimativa da circulação geral e a troca d'água do sistema lagunar.

O Modelo AD é calibrado por intermédio dos coeficientes de dispersão. Com não existem medições adequadas à calibração dos coeficientes de dispersão, a escolha desses baseia-se em parte na experiência. Utilizou-se o programa HD / AD por um período equivalente a oito semanas, para simular a advecção e a dispersão de sal, com um campo de salinidade inicial baseado em medições pontuais feitas na campanha da primavera de 1992 do PROVIDA. O objetivo de tais simulações foi calibrar os coeficientes de dispersão, a fim de manter a estrutura e o nível do campo de salinidade inicial ao longo das oito semanas de simulação. Se os coeficientes de dispersão forem muito grandes, muito sal será dispersado no sistema lagunar, proveniente do contorno correspondente ao oceano; se eles forem muito pequenos, as salinidades dentro do sistema diminuirão de maneira não realística. Obteve-se um resultado razoável com coeficientes de dispersão de 5 m²/s.

Um efeito que não foi levado em consideração nas simulações AD é a reentrada de água da lagoa, proveniente do oceano. Se a água que esco das lagoas para o oceano não for removida da área de saída, por exemplo, por correntes costeiras, parte dela reentrará nas lagoas quando o nível d'água novamente se elevar. Tal efeito reduzirá a troca d'água. A importância desse efeito depende muito das condições das correntes na área costeira próxima à saída. Se a água ficar estagnada, o efeito na reentrada será significativo. No caso em questão, as informações sugerem a presença de uma corrente costeira que removerá a maior parte da água da lagoa que entra no oceano.

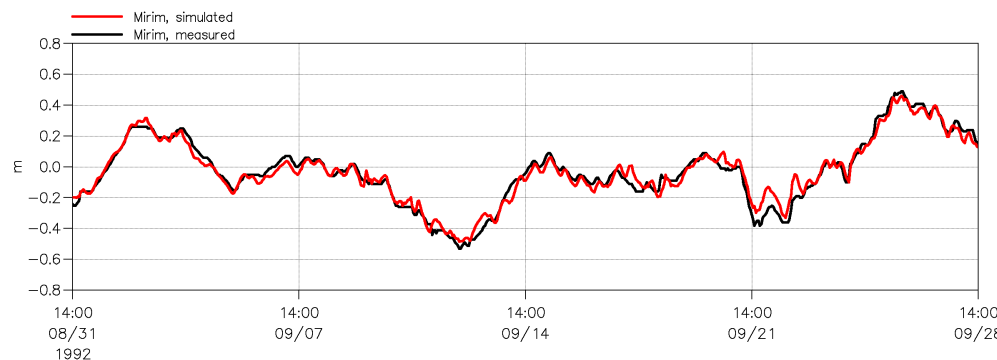
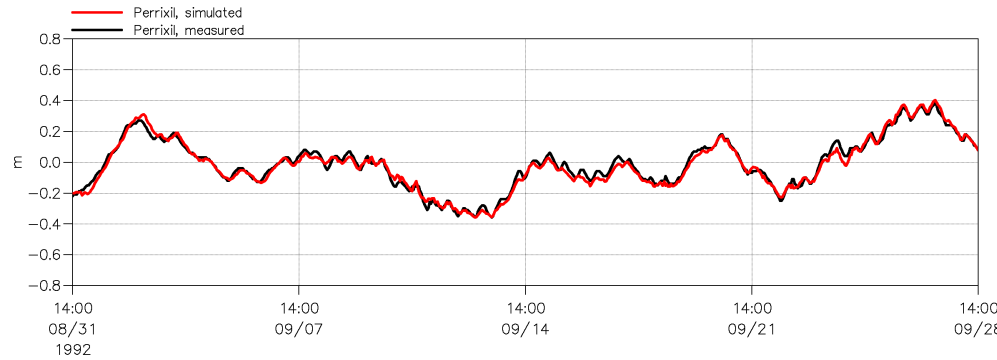
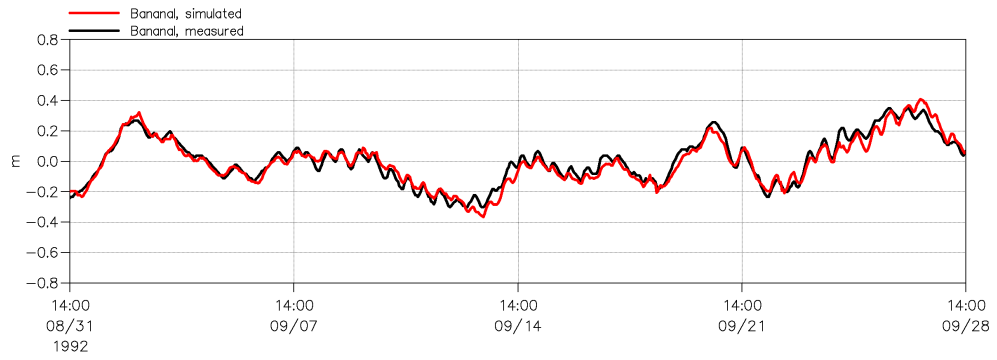
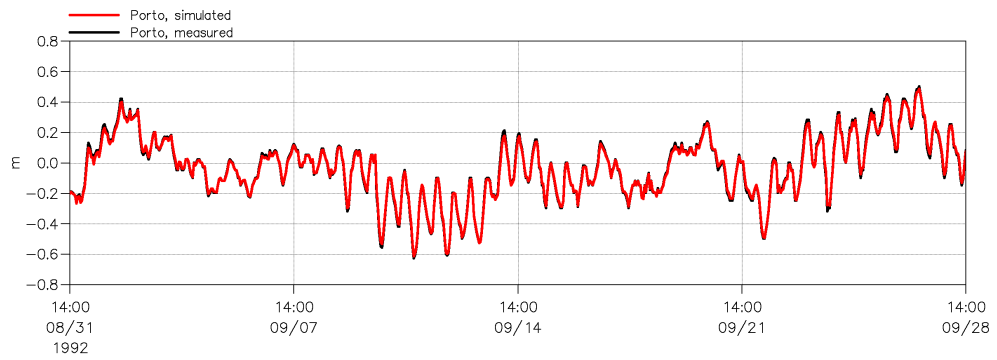


Figura 4a - Calibração. Comparação entre os níveis d'água medidos e os simulados

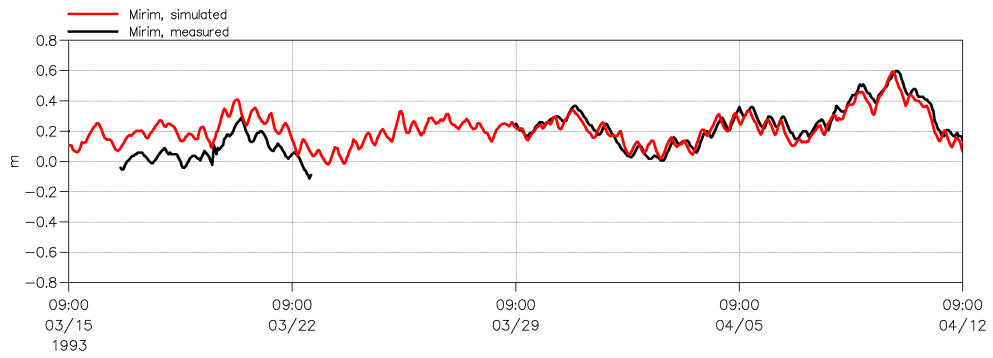
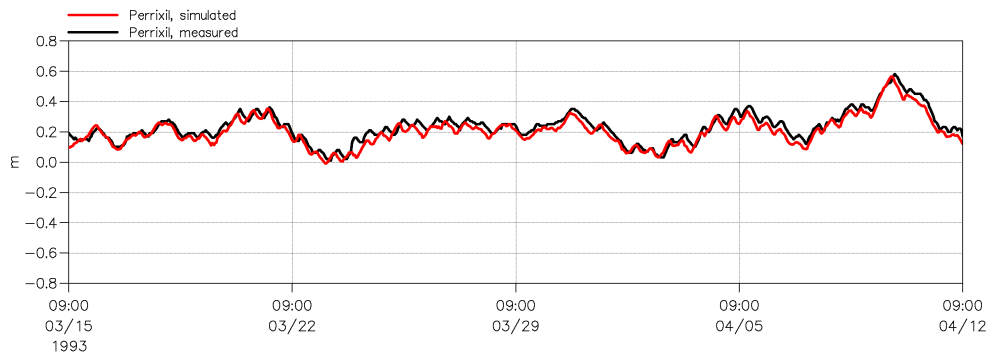
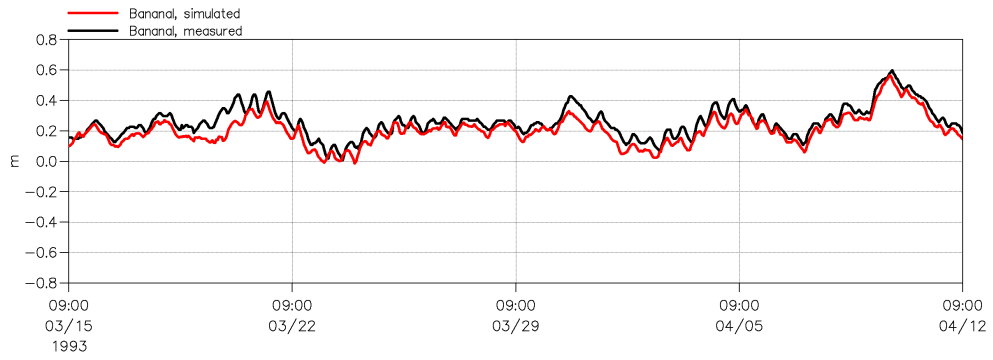
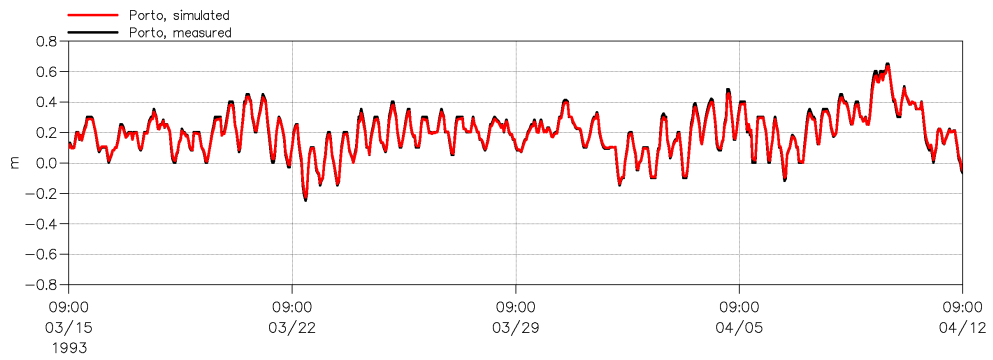


Figura 4b - Validação. Comparação entre os níveis d'água medidos e os simulados

Estudos com o Modelo Hidrodinâmico (MIKE 21 HD)

Realizou-se primeiramente uma simulação de referência, com o aterro existente e as descargas históricas do Rio Tubarão. Essa simulação abrangeu 8 semanas (29/08/92 14:00 – 26/10/92 14:00) e este período foi selecionado, entre aqueles com dados disponíveis, como sendo o mais representativo possível.

A Figura 5 apresenta para as situações típicas de enchente e de vazante as velocidades das correntes e seus respectivos vetores.

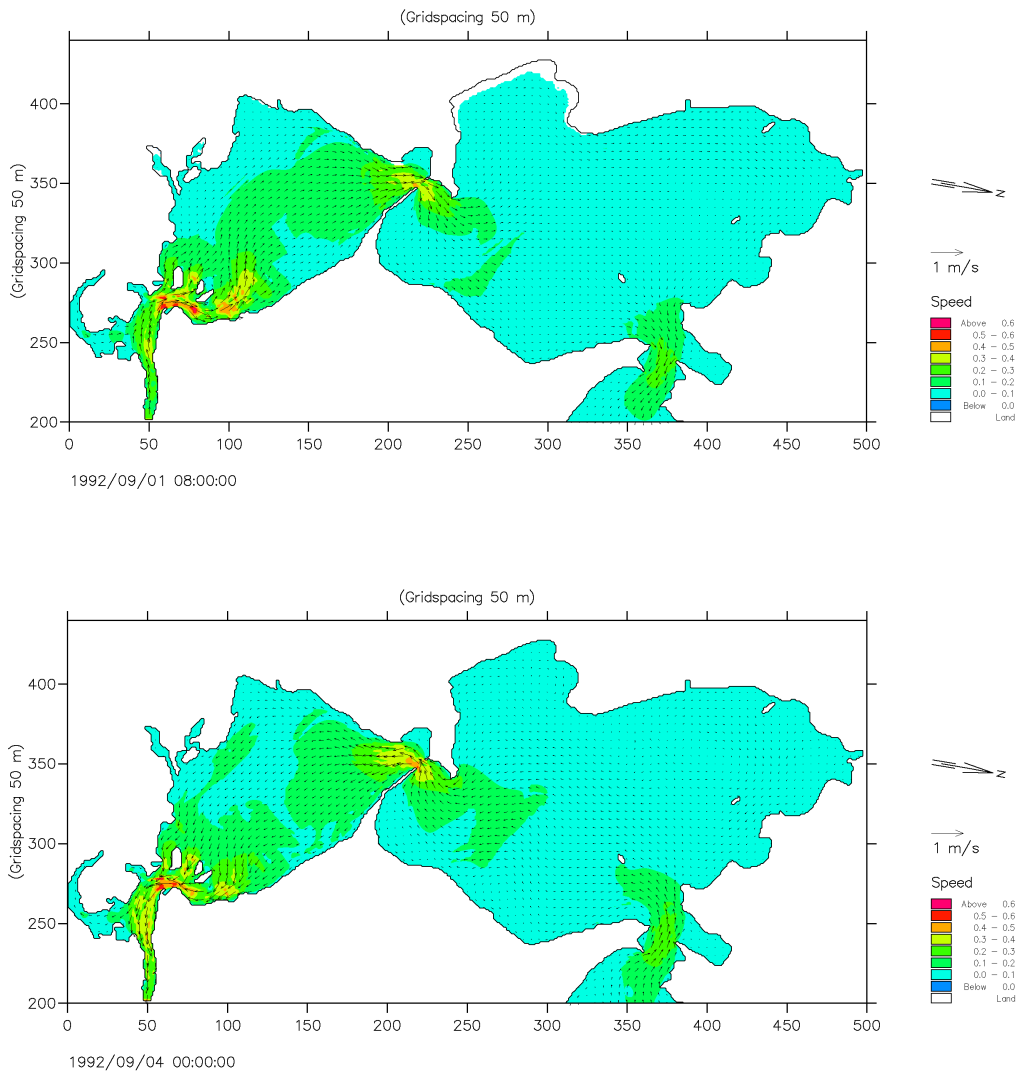


Figura 5 - Representação das correntes. Situações típicas de enchente (figura superior) e de vazante (figura inferior)

Estudos com o Modelo de Advecção-Dispersão (MIKE 21 AD)

Para a simulação de referência, estudou-se quatro cenários para a modelagem de advecção-dispersão (AD), conforme descrito a seguir:

Cenário 1: Investigar o destino da água do Rio Tubarão, representando-a por um componente AD conservativo (100 mg/l). Neste caso, não é considerada a água do Rio Tubarão já presente nas lagoas, mas sim apenas a água proveniente do rio que será descarregada durante a simulação.

Cenário 2: Semelhante ao primeiro, mas o componente AD tem um decaimento de $0,8E-5$ s, correspondendo a um T 50 de 24 h. Assim, o componente AD pode ser considerado como um traçador exemplar para um poluente em decaimento.

Cenário 3: Investigar a intrusão de água oceânica no sistema lagunar, definido por um componente AD conservativo. Novamente, neste caso, a água proveniente do oceano e já presente no sistema lagunar não será considerada.

Cenário 4: Investigar a renovação de água da lagoa do Imarui, definido por um coeficiente AD conservativo. A redução das concentrações na lagoa do Imarui representará a diluição da água da lagoa.

A segunda simulação cobriu o mesmo período e as mesmas vazões para o rio Tubarão, tendo porém, sido removido da batimetria o aterro existente no canal de Laranjeiras. Nesta segunda simulação testaram-se os mesmos cenários da primeira simulação.

Com o objetivo de estimar os efeitos de uma vazão extrema do rio Tubarão foi feita uma simulação de uma semana com a vazão de $350 \text{ m}^3/\text{s}$, ocorrida em 01/09/92.

A Influência do rio Tubarão e do aterro do canal de Laranjeiras

A Figura 6 exhibe a série temporal das concentrações do traçador do rio Tubarão simuladas em diferentes posições na lagoa do Imarui, para as condições atuais (incluindo o aterro). Tais concentrações podem ser encaradas, no caso do traçador conservativo, como o volume de água do rio Tubarão (em percentual) presente na água da lagoa do Imarui.

O modelo parece simular relativamente bem os níveis d'água. Os resultados sugerem que um volume significativo e relativamente constante de água do rio Tubarão está presente na lagoa do

Imarui. É importante compreender que a água do rio Tubarão não fica parada na lagoa, sendo renovada de modo semelhante às outras frações de água que constituem a água da lagoa do Imarui: a água do rio Tubarão entra e sai da lagoa em um processo contínuo.

A Figura 6 também ilustra o alcance de um componente em decaimento, tal com a bactéria coliforme de material orgânico. Nesse caso, as concentrações de traçadores podem ser encaradas como a fração (percentual) que fica da concentração inicial do componente. O coeficiente de decaimento utilizado equivale a um decaimento de 50% em 24 horas. Para este coeficiente de decaimento, observa-se que concentrações relativamente baixas de fato atingem a entrada da lagoa e que concentrações muito baixas (0-0,5% da concentração inicial) alcançam a parte central da lagoa.

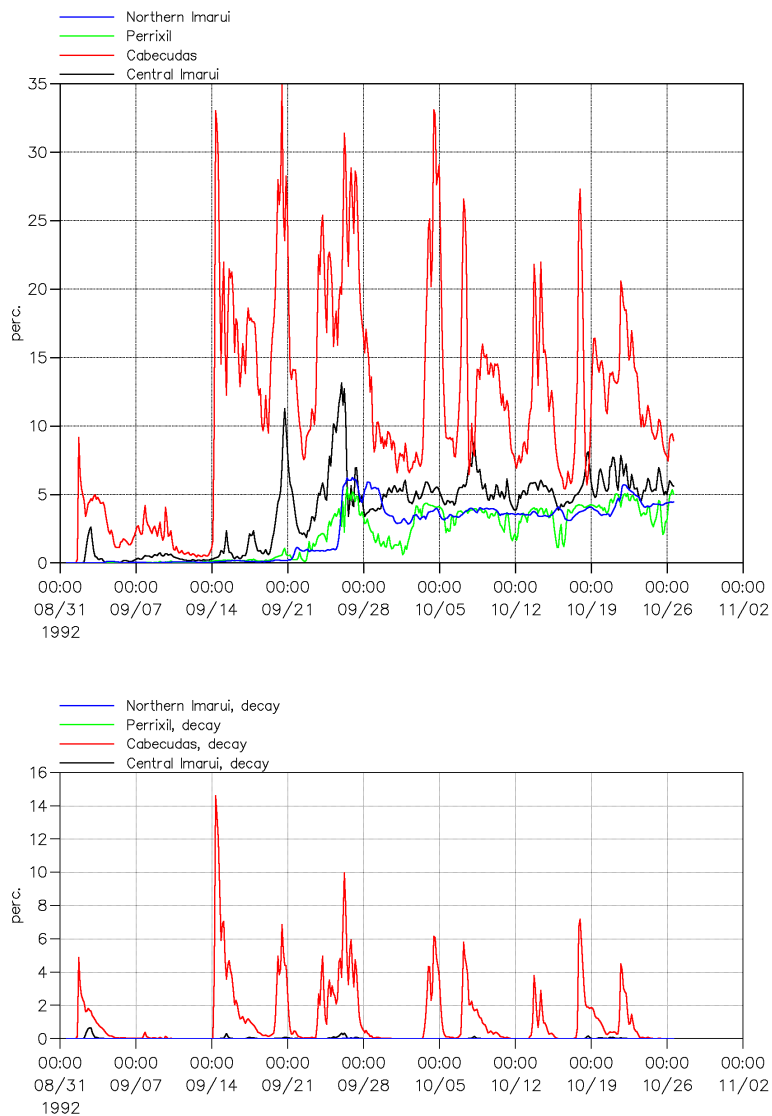


Figura 6 - Concentrações na lagoa do Imarui para a situação atual devidas a um poluente lançado pelo rio Tubarão. Figura superior: concentrações para um traçador conservativo; figura inferior: concentrações para um traçador com decaimento linear.

Os efeitos que o aterro no canal de Laranjeiras exerce na influência do rio Tubarão sobre a Lagoa do Imarui encontram-se ilustrados na Figura 7. Nela estão comparados os resultados das simulações com e sem aterro. Observa-se da figura que a ausência do aterro parece diminuir ligeiramente o volume do rio Tubarão.

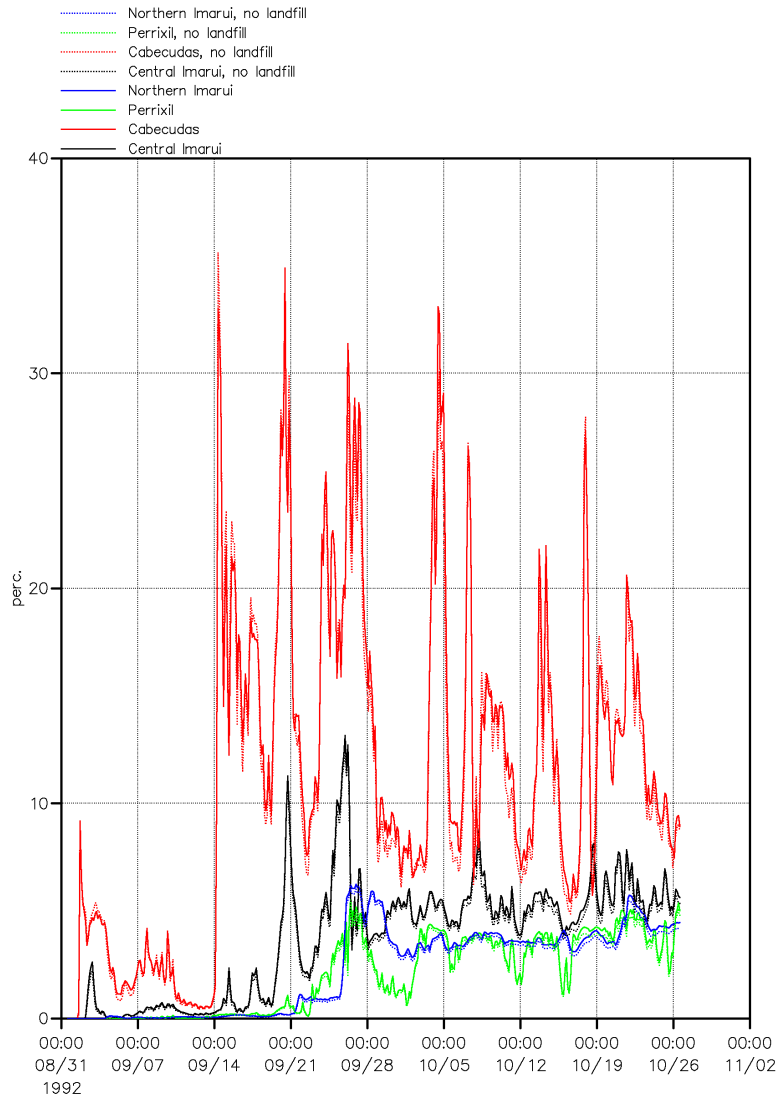


Figura 7 - Concentrações do traçador do rio Tubarão na lagoa do Imarui. As curvas contínuas representam a situação atual e as curvas pontilhadas representam as condições antes da construção do aterro.

A Figura 8 compara as descargas simuladas da água do rio Tubarão na seção transversal do aterro no canal de Laranjeiras, com descargas históricas / extrema do rio Tubarão e aterro / sem aterro, durante o evento de entrada de água ocorrido em 01-02/09/92. Verifica-se que, nas descargas

instantâneas, com a descarga extrema do rio Tubarão, resulta que cerca de 5 vezes mais água do rio Tubarão passa pela seção transversal do aterro no canal de Laranjeiras (em ambas as direções). Vê-se, das descargas acumuladas, que o evento extremo acarreta um aumento significativo, nas águas do rio Tubarão que passa pelo aterro no canal de Laranjeiras e que estas águas mantêm-se por cerca de 5-6 dias no interior da lagoa. Pode-se concluir que um evento extremo desta magnitude possui um impacto substancial sobre a lagoa do Imarui e possivelmente também na lagoa do Mirim, podendo durar vários dias.

Com relação aos efeitos do aterro, pode-se observar que as simulações sem o aterro implicam uma renovação maior, pois a descarga acumulada ao longo da seção transversal do canal de Laranjeiras diminui mais rapidamente.

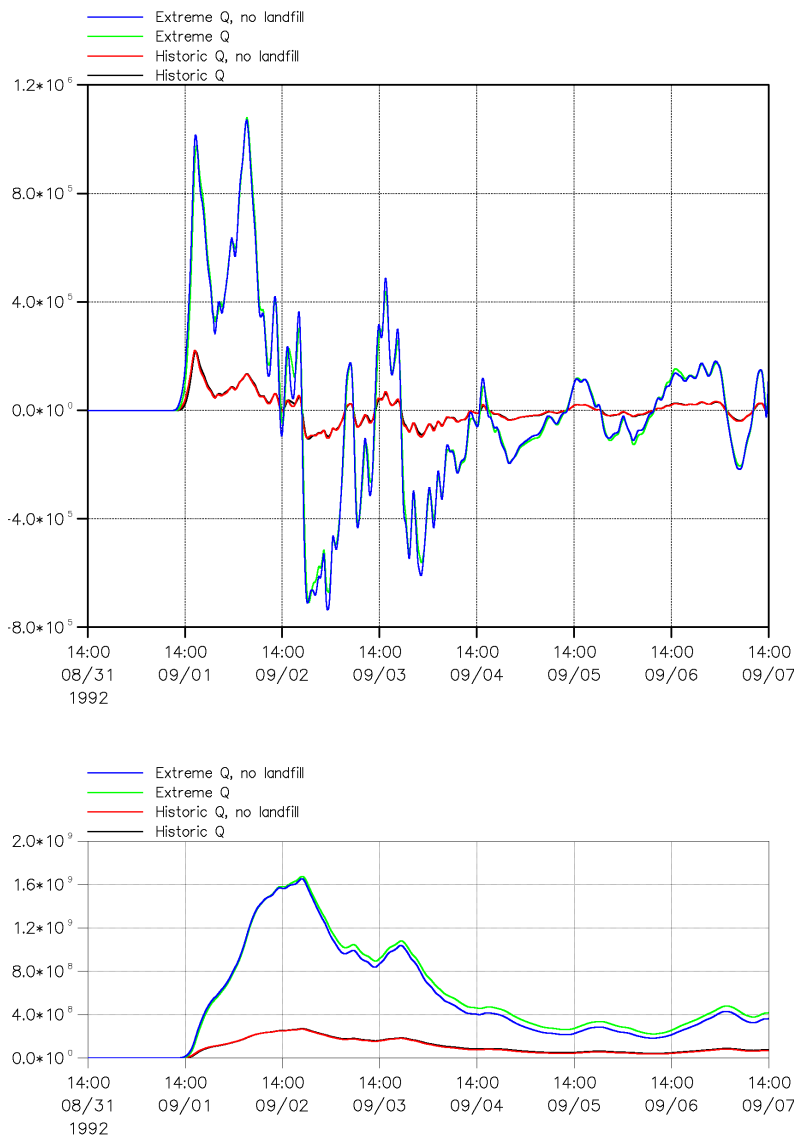


Figura 8 - Descargas de água do rio Tubarão através da seção transversal do canal de Laranjeiras (e para dentro da lagoa do Imarui). Figura superior: descargas instantâneas (unidade: 0.01 m³/s); Figura inferior: descargas acumuladas (unidade: 0.01 m³).

A Figura 9 é semelhante à Figura 8, porém mostra as descargas simuladas de um poluente em decaimento do rio Tubarão. Observa-se, na figura, que uma quantidade substancial do traçador poluente de fato entra na lagoa durante o evento de entrada de fluxo. A partir daí, o traçador decai rapidamente, conforme demonstram as pequenas descargas constantes acumuladas nos últimos 2-3 dias de simulação.

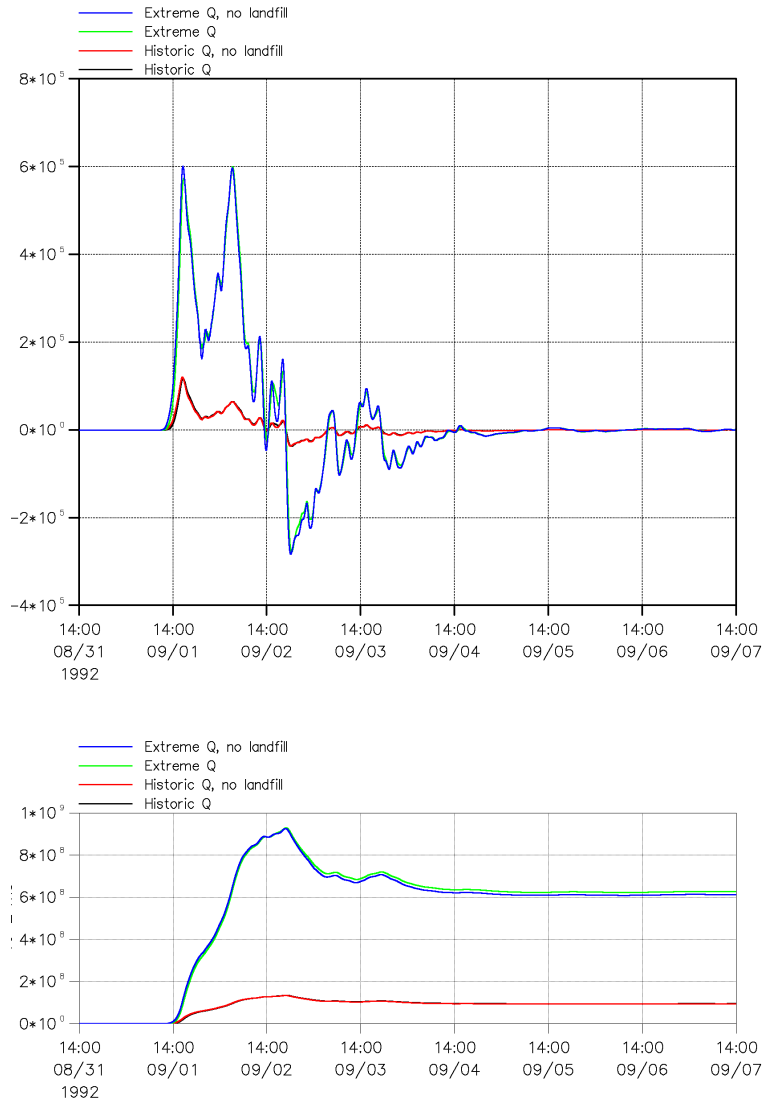


Figura 9 - Descargas do poluente do rio Tubarão com decaimento linear através da seção transversal do canal de Laranjeiras (e para dentro da lagoa do Imarui). Figura superior: descargas instantâneas (unidade: 0.01Cini m3/s); Figura inferior: descargas acumuladas (unidade: 0.01Cini m3).

Troca de Água Geral

Uma medida para a troca de água geral na lagoa do Imarui é o volume de água que entra e que sai pelo canal de Laranjeiras. No decurso da simulação de oito semanas, levando-se em conta as condições existentes, aproximadamente $8,1 \times 10^8 \text{ m}^3$ entram e $9,3 \times 10^8 \text{ m}^3$ saem da lagoa do Imarui pelo canal. Tais volumes correspondem a 7-8 vezes o volume médio da lagoa no mesmo período (cerca de $1,1 \times 10^8 \text{ m}^3$). Sem o aterro esses números passam a ser $8,5 \times 10^8 \text{ m}^3$ (entrando) e $9,8 \times 10^8 \text{ m}^3$ (saindo), ou cerca de 5% superior. É, entretanto difícil avaliar o quanto dessa água que entra e que sai renova de fato as águas da lagoa.

Na Figura 10, apresentam-se as concentrações do traçador da água da lagoa do Imarui em diferentes posições dentro da lagoa. Tais concentrações podem ser encaradas como o volume de água em percentual, em qualquer tempo, que estava presente na lagoa do Imarui no início da simulação, por isso ele começa com o valor 100. Observa-se na figura que as águas da lagoa do Imarui se diluem de modo que, após 8 semanas de simulação, apenas cerca de 30% das águas inicialmente presente permanecem na lagoa. Esta diluição é feita pelas águas das lagoas Santo Antônio e do Mirim, dos rios que deságuam diretamente na lagoa do Imarui e do oceano.

A Figura 11 indica o quanto de água do oceano entra na lagoa do Imarui. Tal como no caso anterior, vê-se que o modelo necessita de 3-4 semanas de “aquecimento”, antes que o traçador de água oceânica atinja a lagoa do Imarui. Após este período, o nível do volume de água oceânica parece se tornar relativamente permanente, em torno de 9-12%, dependendo da posição na lagoa. Novamente, deve-se fazer algumas restrições quanto às incertezas do fluxo fluvial que entra e as potenciais flutuações a longo prazo.

Os efeitos que a retirada do aterro exerce na troca de água geral também encontram-se indicados nas Figuras 10 e 11. Parece que a remoção do aterro diminui ligeiramente a diluição da água da lagoa do Imarui, bem como a intrusão de água do oceano. Isso parece contradizer o fato de que mais água entra e sai da lagoa pela canal de Laranjeiras, conforme descrito acima. A explicação para isto pode residir no fato de que a presença do aterro aumenta a mistura dentro da lagoa, aumentando com isso, ligeiramente, a troca e a diluição da água.

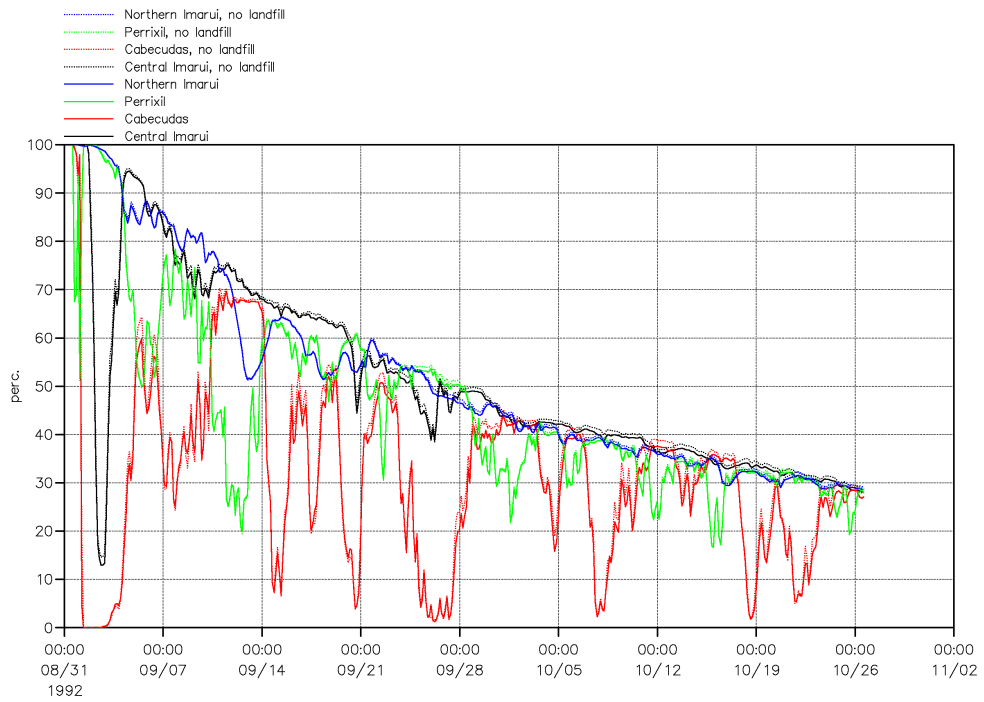


Figura 10 - Concentrações do traçador, simuladas para a situação atual e sem o aterro

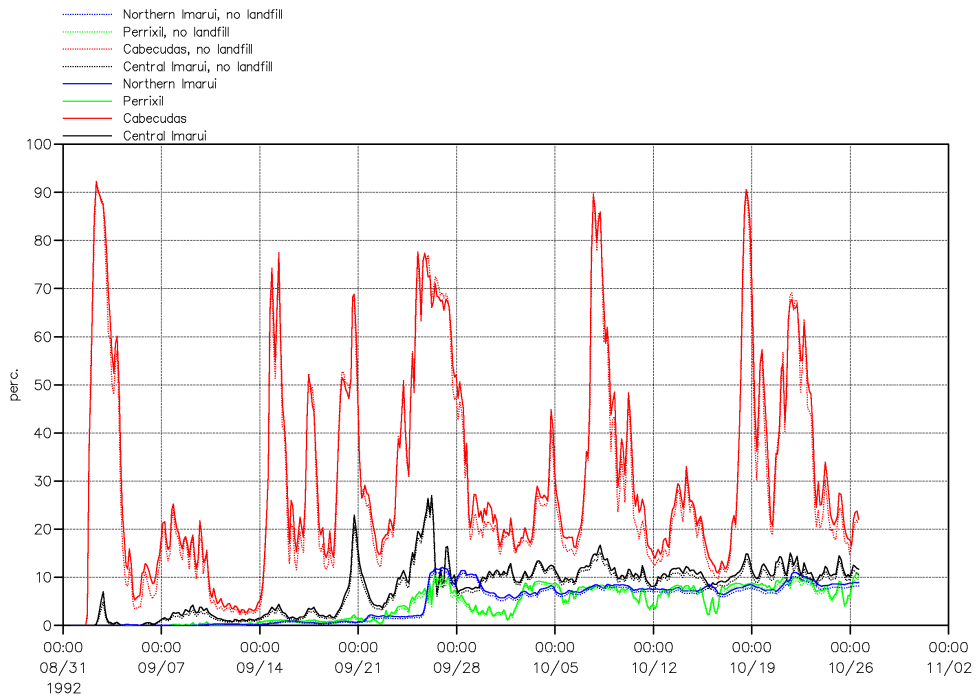


Figura 11 – Concentrações do traçador oceânico, simuladas para a situação atual e sem o aterro

CONCLUSÕES

Com base no estudo realizado, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- As comparações entre as simulações **com** e **sem** o aterro de Cabeçadas revelaram apenas pequenas diferenças com relação à troca geral de águas e à influência das águas do Rio Tubarão.
- O sistema Santo Antônio-Imarui-Mirim não apresenta boas condições de circulação d'água, já que, na situação atual, o tempo requerido para a renovação das suas águas é de aproximadamente 14 dias.
- As simulações feitas retirando-se todo o aterro no canal de Laranjeiras conduziram a um ganho em termos de tempo de renovação das águas do sistema de cerca de 7 horas, enquanto o ganho em termos de acréscimo no volume de água atualmente entrando e saindo de Imarui foi de 5,38%. Esses valores não são significativos, para que se possa recomendar a remoção do aterro, como medida para melhorar a circulação de água nas lagoas.
- A seção de controle do sistema Santo Antônio-Imarui-Mirim está localizada na embocadura da Barra de Laguna. É essa seção que controla a entrada do prisma de maré no sistema e, conseqüentemente, as condições de circulação d'água nas lagoas. Apenas as intervenções feitas na embocadura podem causar um maior impacto sobre a circulação d'água nas lagoas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Convênio DNER/IME – Simulações e Estudos de Circulação d' Água e de Dispersão de Poluentes no Complexo Lagunar Sul de Santa Catarina. Projeto de Duplicação da Rodovia BR-101, trecho Florianópolis/Sc – Osório/RS. Rio de Janeiro, 2001.

DHI – Danish Hydraulic Institute – MIKE 21, A Modelling System for Estuaries, Coastal Water and Seas. Theory and User Manual. 1999.

INPH – Medições Hidráulico-Sedimentológicas, Físico-Químicas e Biológicas no Sistema Lagunar Sul Catarinense. Relatório Final. PROVIDA/SC. Dezembro 1994.

UNISUL – Avaliação Físico-Química do Sistema Lagunar Sul Catarinense. Relatório Conclusivo. PROVIDA/SC. Convênio INPH/UNISUL. Tubarão, Maio 1994.

FATMA – Aspectos Ambientais do sistema Lagunar Santo Antônio, do Imaruí e do Mirim. 1980/83, Florianópolis, 1983, 104p.