

Porto de Santos

Modelagem do transporte de sedimentos

IME

**Relatório Final
Fevereiro 2008**

Porto de Santos
Fevereiro 2008

Agern Allé 5
 DK-2970 Hørsholm, Denmark

Tel: +45 4516 9200
 Fax: +45 4516 9292
 Dept. fax: +45 4516 8952
 e-mail: dhi@dhigroup.com
 Web: www.dhigroup.com

| | | | | | |
|---|-----------------|--|---------|----------|--------------------|
| Cliente Instituto Militar de Engenharia | | Representante do Cliente Jose Carlos Amorim | | | |
| Projeto Porto de Santos | | Projeto No 53773 | | | |
| Autores Berry Elfrink Klavs Bundgaard Ulrik Lumborg Cesar Bacilla Munhoz Rocha | | Data 7 Fevereiro 2008 | | | |
| | | Aprovado por Hans Jacob Vested | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| 0 | Relatório Final | KLB | BRE | HJV | 07/02/08 |
| Revisão | Descrição | Por | Checado | Aprovado | Data |
| Palavras Chave Aprofundamento Hidráulica Salinidade Dragagem Porto de Santos Brasil | | Classificação <input type="checkbox"/> Aberto <input type="checkbox"/> Interno <input checked="" type="checkbox"/> Proprietário | | | |
| Distribuição | | | | | No de copias |
| IME: DHI: | | J.C. Amorim KLB, HJV, JAO | | | 1 pdf + 1 3 pdf |



CONTENTS

| | | |
|-----|--|------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 1-2 |
| 2 | RESUMO E CONCLUSÃO..... | 2-1 |
| 3 | POSSÍVEIS IMPACTOS HIDRÁULICOS DO APROFUNDAMENTO DO CANAL..... | 3-1 |
| 4 | O MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO..... | 4-1 |
| 4.1 | Descrição do modelo..... | 4-1 |
| 4.2 | Dados disponíveis..... | 4-2 |
| 4.3 | Considerações gerais..... | 4-4 |
| 4.4 | Montagem do modelo..... | 4-5 |
| 5 | RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO..... | 5-1 |
| 6 | ABORDAGEM E ESCOLHA DE CENÁRIOS..... | 6-1 |
| 6.1 | Mudanças na intrusão salina..... | 6-1 |
| 6.2 | Mudanças na dinâmica do sedimento..... | 6-3 |
| 7 | ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES EM MODELO..... | 7-1 |
| 7.1 | Resultados gerais..... | 7-1 |
| 7.2 | Impactos na sedimentação entre os cenários 3 e 1..... | 7-7 |
| 7.3 | Impactos na sedimentação entre os cenários 4 e 2..... | 7-8 |
| 7.4 | Impactos na sedimentação entre os cenários 7 e 5..... | 7-9 |
| 7.5 | Impactos na sedimentação entre os cenários 8 e 6..... | 7-9 |
| 7.6 | Balanço da sedimentação anual..... | 7-10 |
| 8 | REFERÊNCIAS..... | 8-1 |

APÊNDICE A - Fatores de escala para as condições meteorológicas.

APÊNDICE B – Versão ampliada das áreas de sedimentação.



1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste estudo é avaliar o impacto do aprofundamento projetado para o canal de navegação de entrada no Porto de Santos, em relação as seguintes características:

- Hidrodinâmica: Descargas no sistema aquático e lagunar, níveis de água, correntes e distribuição do fluxo no canal.
- Salinidade: Intrusão da cunha salina e estratificação.
- Sedimento: Mudanças no balanço de sedimento.

Este relatório apresenta a calibração do modelo de transporte de sedimento e o cálculo do possível impacto do aprofundamento no balanço de sedimento no estuário.

O sedimento no estuário de Santos tem em geral granulometria fina (lodo e lama). Assim sendo a avaliação está voltada para o comportamento do sedimento com granulometria fina, que permanece na água por períodos de tempo mais longos e são transportados a maiores distâncias. O impacto do aprofundamento do canal de navegação na dinâmica e comportamento deste sedimento fino é o assunto principal deste relatório.



2 **RESUMO E CONCLUSÃO**

Foi executado um estudo compreensivo do impacto do aprofundamento do principal canal de acesso ao Porto de Santos. O estudo teve por objetivo estabelecer o balanço de sedimentos no estuário de Santos e fornecer uma avaliação das possíveis mudanças após o aprofundamento do canal de acesso. O estudo foi realizado levando-se em consideração os efeitos de várias condições meteorológicas.

Foi feita uma calibração completa do modelo tridimensional (3D) de transporte de sedimento, a qual mostrou bons resultados quando comparados às medições realizadas ao longo do canal de acesso principal.

Com o modelo numérico calibrado foram simulados oito diferentes cenários. A duração de cada simulação foi de um ciclo completo de marés de quadratura e sizígia (14 dias).

As seguintes conclusões foram obtidas:

- O aprofundamento do canal de acesso e da bacia de evolução do estuário de Santos terá um efeito na dinâmica do sedimento no estuário.
- O aporte de sedimento para o estuário aumentará como um todo em aproximadamente 2%, mas este valor não está distribuído uniformemente por toda a área.
- O canal de acesso assoreará com uma taxa mais rápida e os terraços de marés crescerão mais lentamente que agora. No entanto, o padrão de erosão/deposição não mudará. Só as taxas anuais se alterarão com grandezas entre 2% e 26%.
- Os resultados mostraram que, em geral, o estuário está assoreando lentamente, porém pode ocorrer alguma erosão localizada.
- A sedimentação será maior na região a jusante da bacia de evolução e menor nas regiões a montante. Isso ocorre porque a bacia de evolução atua como uma armadilha de sedimento e, então, menos sedimento estará disponível para sedimentação a montante dessa área. Esta também é a razão para a diminuição da sedimentação no canal interno.
- O principal processo pelo decréscimo da taxa de sedimentação na região interna do estuário é o aprofundamento da bacia de evolução do Porto de Santos. O aumento da profundidade dessa seção do canal faz com que a velocidade do fluxo diminua, e conseqüentemente, induza há maior deposição sedimentar. Dessa maneira, menos sedimento fica disponível a montante dessa zona.



A Figura 1-1 apresenta a definição das subáreas utilizadas no estudo e a massa de deposição sedimentar anual (em toneladas/ano) antes e depois do aprofundamento do canal principal.

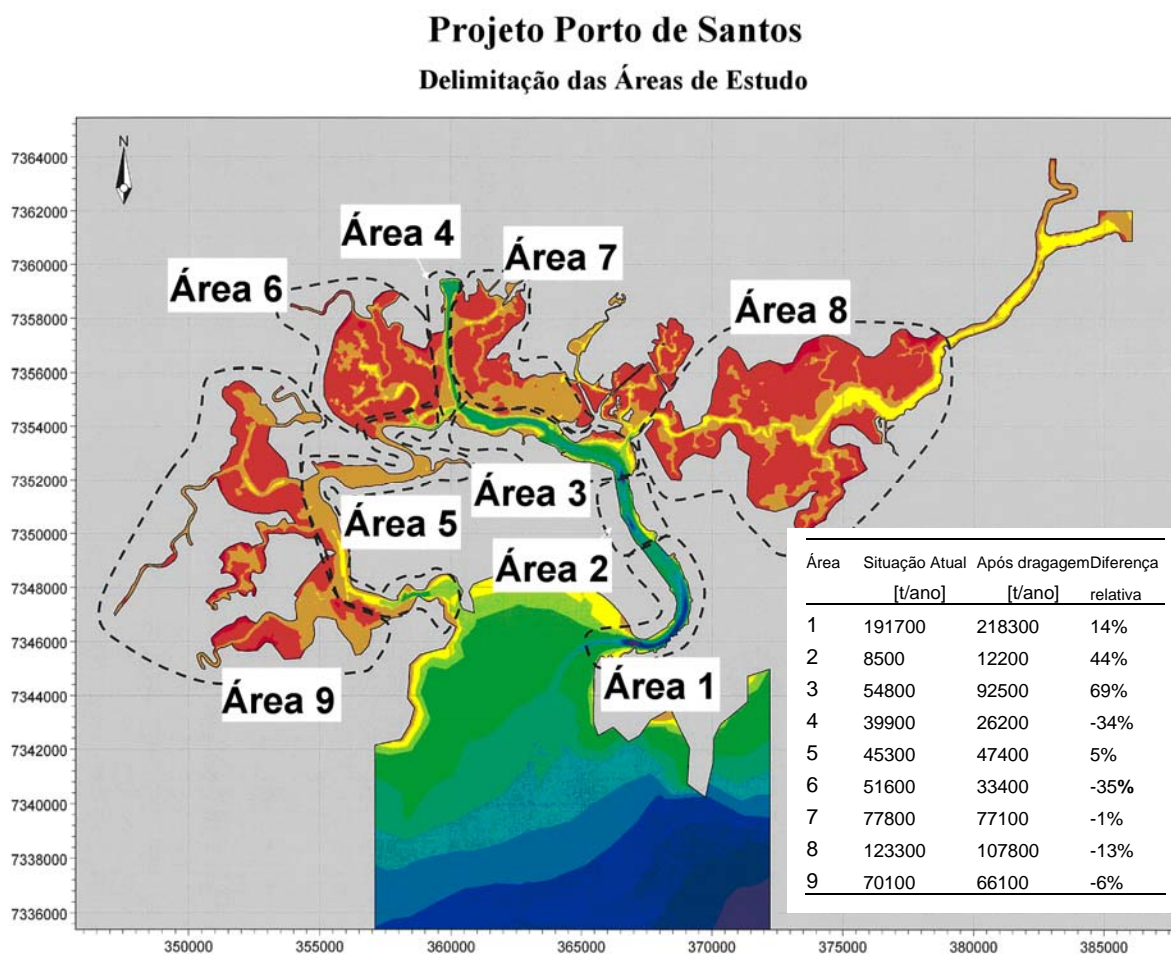


Figura 1-1: Visão geral das taxas de sedimentação.

As taxas anuais de sedimentação estão apresentadas na Tabela 1-1.

Tabela 1-1: Taxas anuais de deposição global e no canal de acesso principal em toneladas.

| | Canal de acesso principal (Áreas 1-3) | Total (Áreas 1-9) |
|--|--|----------------------|
| Taxa de sedimentação, sem aprofundamento [t/ano] | 255000 | 663000 |
| Taxa de sedimentação, com aprofundamento [t/ano] | 323000 | 680000 |
| Aumento percentual de deposição (tx de dragagem) | 26% | 2% |



3 POSSÍVEIS IMPACTOS HIDRÁULICOS DO APROFUNDAMENTO DO CANAL

O Porto de Santos está situado num sistema estuarino e lagunar que pode ser caracterizado como um estuário parcialmente estratificado. A amplitude da maré é da ordem de 1.5m. A Figura 3-1 abaixo apresenta os contornos de fundo para o estuário de Santos, a linha vermelha indica o perfil batimétrico apresentado na Figura 3-2. O canal será dragado até uma profundidade de 15m (Nível Médio do Mar –NMM).

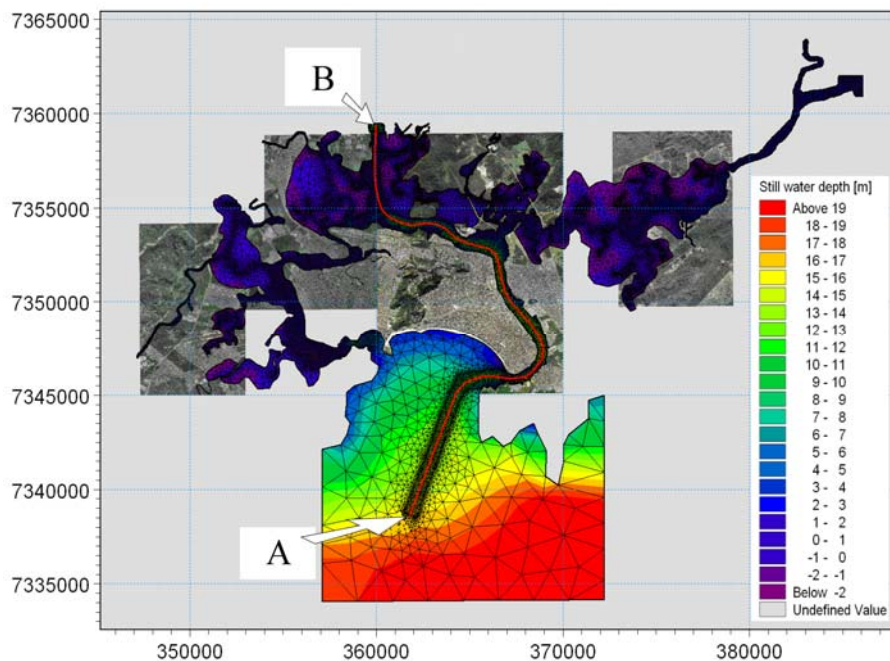


Figura 3-1: Arranjo proposto para o novo canal de acesso ao Porto de Santos com uma profundidade de água de 15m NMM.

Um corte vertical ao longo do canal de acesso está indicado pela linha vermelha na Figura 3-2 e é apresentado na Figura 3-2 abaixo. Para a situação existente (esquerda) e para o aprofundamento planejado em 15m NMM (direita).

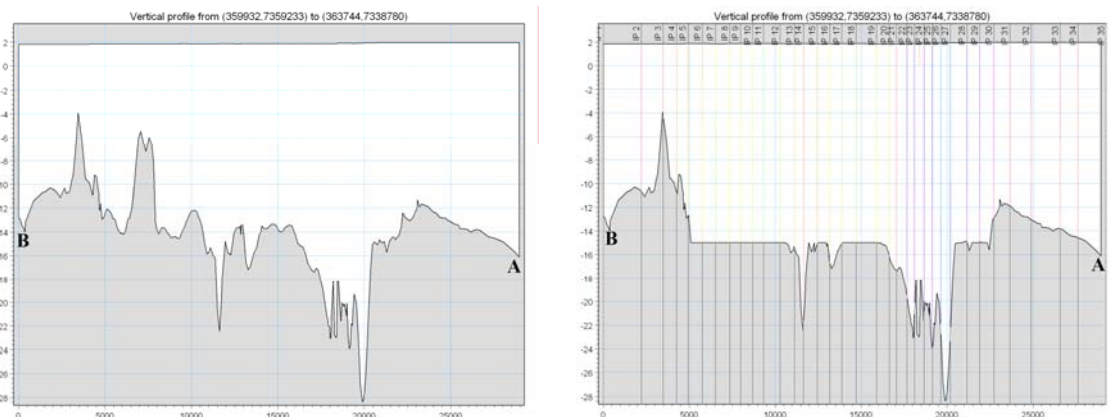


Figura 3-2: Corte vertical para o novo canal de acesso ao Porto de Santos com uma lâmina de água de 15m NMM, antes e após o aprofundamento. As letras A e B indicam os pontos da Figura 3-1.



Em geral, o aprofundamento de canais de navegação e o aterro de terraços de marés mudam as condições hidráulicas. A resposta é específica para cada local, mas frequentemente causa um aumento na amplitude das marés e nas velocidades das correntes. Em estuários parcialmente estratificados, por exemplo, a cunha salina pode se mover mais para o interior do estuário, aumentando a intrusão salina. Isto induz mudanças nas condições de transporte de sedimento. Velocidades mais altas induzem mais erosão e advecção dos sedimentos em suspensão. O aumento da intrusão salina também pode aumentar o aporte de sedimentos marinhos finos. Como resultado, a localização da turbidez máxima, por exemplo, pode se deslocar e a capacidade do estuário em auto-depurar sedimentos finos pode ser reduzida. Essas características em combinação com a realização de um aterro, para a expansão de empreendimentos industriais, por exemplo, pode aumentar mais ainda a sedimentação no estuário de Santos através da redução do espaço de sedimentação dos terraços de marés.

A resposta do sistema estuarino às mudanças pode ser melhor descrita através da aplicação de um modelo numérico. O modelo é aplicado do seguinte modo: Primeiramente as condições existentes são simuladas e o modelo é calibrado para reproduzir as medições de campo. Em seguida o futuro arranjo do estuário é introduzido no modelo. As mudanças relativas à situação atual podem, então, ser quantificadas.

Para o aprofundamento do Porto de Santos os seguintes impactos são relevantes, todos eles relativos à situação atual.

Tabela 3-1: Impactos do aprofundamento do canal do Porto de Santos.

| | Item | Quantificação |
|---------------|---------------------------------|--|
| Hidrodinâmica | Níveis de água | Amplitude da maré na área |
| | Correntes | Correntes máximas na área |
| | Descargas | Seções transversais selecionadas |
| | Padrão do escoamento | Redistribuição do escoamento na lagoa através de análises com traçadores |
| Salinidade | Sal | Mudança na salinidade superficial |
| | Sal | Mudança na salinidade de fundo |
| | Sal | Mudança na estratificação |
| Sedimento | Despojos de sedimento | Espalhamento durante a dragagem |
| | Despojos de sedimento excedente | Espalhamento durante dragagem de manutenção |
| | Quantidade de sedimento | Balço de sedimento |
| | Erosão/deposição | |

O impacto no balanço de sedimento depende principalmente do estado de equilíbrio existente e da disponibilidade de sedimentos móveis. Embora as mudanças imediatas possam ser pequenas, a resposta acumulada do sistema pode ser significativa ao longo de um período mais longo de tempo. A resposta do sistema é determinada tanto pelo comportamento do sedimento em curto prazo, tipicamente relativo a situações geradas por marés e ventos (tempestades), bem como pelo comportamento do sedimento em longo prazo, devidas às variações ano a ano na contribuição fluvial e nas condições marítimas. Assim, do ponto de vista de avaliação da deposição de finos, é importante considerar as mudanças no transporte de sedimento durante um intervalo de tempo suficientemente longo, para determinar o impacto pleno e as conseqüências das intervenções, que podem ser, por exemplo, um aumento na profundidade do canal de navegação, construção de



guias-correntes ou mudança na estratégia de gerenciamento do sedimento. Isto está apresentado na Figura 3-3.

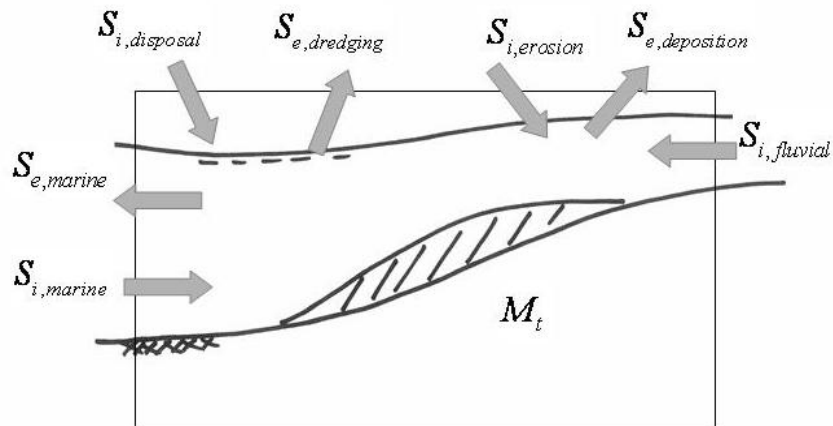


Figura 3-3: Balanço de sedimento fino, os índices e e i denotam exportação (perda) e importação (fonte), respectivamente.

A avaliação de causas e efeitos é facilitada pela avaliação do balanço de massa, onde a quantidade de sedimento em movimento $M_{t+\Delta t}$ no tempo $t+\Delta t$ num sistema estuarino pode ser descrita como:

$$M_{t+\Delta t} = M_t + \Delta M_t \quad (\text{eq.1})$$

onde

$$\Delta M_t = \text{fonte} - \text{perda}$$

$$\Delta M = (S_{i,\text{marinho}} + S_{i,\text{fluvial}} + S_{i,\text{erosão}} + S_{i,\text{disposição}}) - (S_{e,\text{marinho}} + S_{e,\text{deposição}} + S_{e,\text{dragagem}}) \quad (\text{eq.2})$$

As contribuições para o balanço de sedimento estão definidas na Figura 3-3. Baseado nessa figura a seguinte tabela de causas e efeitos pode ser estabelecida.

Tabela 3-2: Relação de causa e efeito para o estuário de Santos.

| Causa | Efeito |
|-------------------------------|--|
| Redução espacial | Redução de $S_{e,\text{deposição}}$ |
| Aumento da velocidade da maré | Aumento de $S_{i,\text{erosão}}$ |
| Aprofundamento | Aumento em $S_{i,\text{marinho}}$ |
| Aprofundamento | Decréscimo em $S_{e,\text{marinho}}$ |
| Dragagem | Decréscimo em $S_{e,\text{deposição}}$ |

Como resultado das relações supracitadas, os estuários são em geral ambientes de deposição. O sedimento do mar aberto é transportado para a terra e é aprisionado no estuário. Ao mesmo tempo, só um pouco de sedimento dos rios escapa para o mar aberto. Isto torna os estuários ambientes complexos em relação à dinâmica de sedimento. A capacidade de assoreamento fica, em geral, maior com o aumento da lâmina de água.

Através da aplicação do modelo numérico o balanço para sedimento de granulometria fina pode ser estabelecido.



4 O MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO

4.1 Descrição do modelo

Das observações de campo sabe-se que em geral o fluxo na área é bem misturado e só ocasionalmente ocorre uma estratificação fraca. Isto deveria fazer com que um modelo bidimensional integrado na vertical (2D-H) fosse suficiente. No entanto, o impacto do aprofundamento tem claramente possíveis impactos tridimensionais, tais como intrusão salina e transporte de sedimento. Dessa maneira, foi utilizado um modelo 3D no presente estudo.

O modelo de transporte de sedimento aplicado é o modelo MIKE 3 MT. O modelo simula erosão, transporte, decantação e deposição de sedimento com granulometria fina. Devido a dominância de sedimentos finos no estuário de Santos os sedimentos diâmetro mais grosseiros (areia) não foram alvo do estudo. O modelo é essencialmente baseado nos conceitos apresentados na Ref. /2 /. Um esboço dos processos físicos incluídos está apresentado na Figura 4-1.

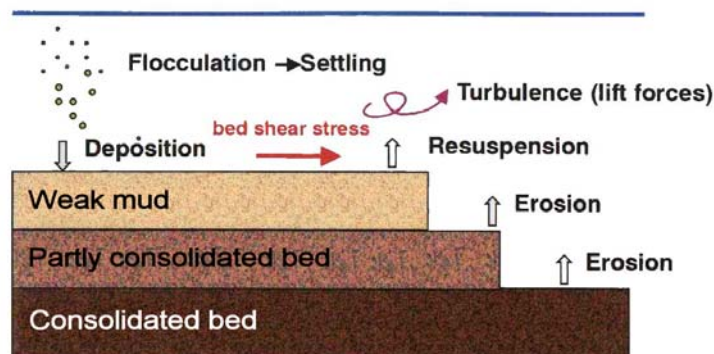


Figura 4-1: Processos físicos incluídos no modelo de transporte de sedimento.

A erosão é modelada usando-se a seguinte formulação:

$$S_E = E \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right)^n, \tau_b > \tau_{ce}$$

onde

S_E é a erosão (kg/m²/seg).

E é o coeficiente de taxa de erosão (kg/m²/seg).

τ_b é a tensão de cisalhamento no leito atual (N/m²).

τ_{ce} é tensão de cisalhamento crítica para erosão (N/m).



n é a potência de erosão.

A deposição é modelada usando-se a formulação de fluxo em decantação.

$$S_D = w_s \times SSC \times P_d, \tau_b < \tau_{cd}$$

onde

S_D é a deposição (kg/m²/seg).

w_s é a velocidade de queda do sedimento (m/seg).

SSC é a concentração de sedimento em suspensão (kg/m³).

P_d é a probabilidade de deposição (depende da diferença entre τ_b e τ_{cd}).

4.2 **Dados disponíveis**

O dado básico de entrada para o cálculo do transporte de sedimento é o campo de velocidade e de elevação da superfície modelados. Os resultados das simulações hidrodinâmicas estão apresentados na Ref. /1 /, embasados pelos dados de campo.

Um levantamento de campo foi realizado em 2006. Durante este levantamento o DHI e o INPH mediram a concentração de sedimento em vários pontos do estuário. Foram coletadas amostras de água no centro dos canais nas mesmas seções transversais onde as medições com o ADCP foram realizadas. Em cada posição, as amostras foram coletadas a 1m do fundo e a 1m abaixo da superfície. As posições das seções transversais investigadas estão mostradas na Figura 4-2. Depois de coletadas, as amostras de água foram levadas ao laboratório onde uma filtragem foi feita. Baseado nela, foi estabelecida a concentração de sedimento.

As concentrações de sedimento medidas estão apresentadas na Figura 4-3.

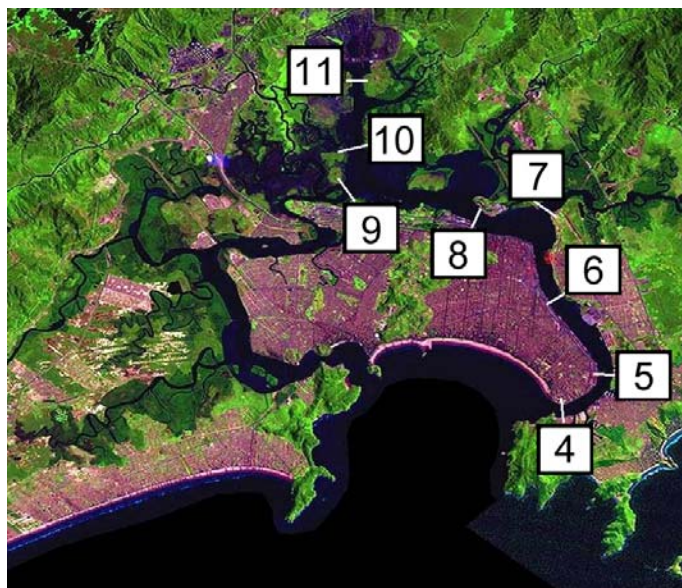


Figura 4-2: Visão geral das seções transversais de medições.

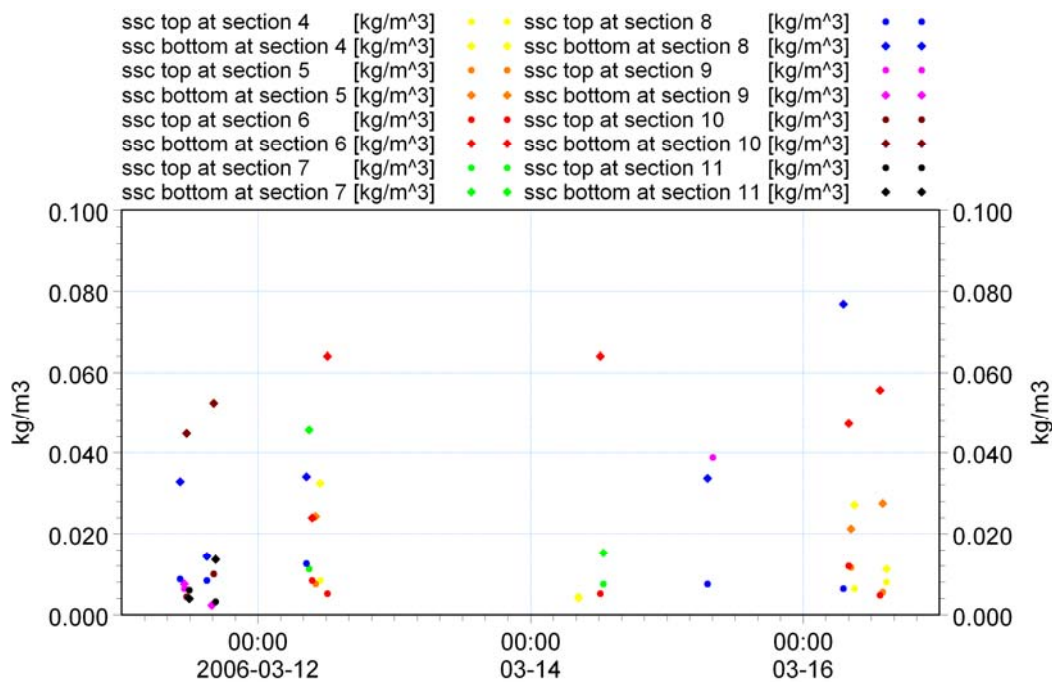


Figura 4-3: Medições de concentração de sedimento em suspensão (SSC).

Além das concentrações de sedimentos em suspensão, foi coletado um total de 30 amostras de sedimento de fundo com um coletor do tipo Petersen. Estas amostras foram distribuídas ao longo de todo o estuário. De acordo com estas amostras, o sedimento perto da entrada do canal (perto do mar aberto) é dominado por areia e silte. Mais para dentro do estuário esta composição muda gradualmente para uma composição com granulometria mais fina. Isto é comum em estuários dominados pela maré, já que o sedimento marinho com granulometria mais grossa se deposita perto da entrada enquanto o sedimento com granulometria mais fina pode ser transportado a distâncias mais longas. Em vários locais da parte interna do estuário as amostras de sedimento mostram uma distribuição bimodal, com uma fração de sedimento muito fino e uma fração de sedimento mais grosso. Nessas amostras, o sedimento mais grosso provavelmente origina-se dos rios enquanto que a fração fina provavelmente se origina principalmente do mar aberto e é transportada lentamente para as áreas internas. As amostras de fundo, porém, mostram que a distribuição granulométrica do sedimento no estuário é muito diversa.

Sabe-se que durante eventos extremos de elevação de nível d'água (ressacas) uma grande sedimentação ocorre na embocadura do canal de acesso (aproximadamente 2×10^6 m³) e que é feita dragagem contínua no canal de acesso. Mesmo não tendo informações da percentagem de areia, silte ou lama dragado se espera que a calibração do modelo de transporte de sedimentos mostre alguma deposição na embocadura e no canal de acesso.

Nenhum dado está disponível sobre as concentrações de sedimento em mar aberto. Consequentemente foram utilizados valores bastante conhecidos de outros estudos no mundo. Neste caso, a concentração no meio ambiente para a fração grossa foi fixada em 0.02 kg/m³ e para a fração fina foi fixada em 0.065 kg/m³.

Foi fornecida pelo cliente informação sobre a contribuição de sedimento dos rios. A contribuição foi fornecida como contribuição total de sedimento por ano e há muita va-



riação entre os rios. A contribuição instantânea é dependente da intensidade das chuvas, da descarga do rio e da disponibilidade de sedimento. Porém, não existe nenhuma fórmula para a correlação entre concentração de sedimento na coluna d'água e descarga fluvial. Consequentemente, neste estudo um valor constante de 0.020 kg/m^3 foi utilizado para a fração grossa. Esta simplificação torna possível investigar a mudança na dinâmica do sedimento como consequência direta da dragagem. Como o período de modelagem é relativamente curto, a contribuição dos rios é menos importante. Assumiu-se que a fração fina origina-se principalmente do mar e assim a contribuição fluvial desta fração foi fixada em zero.

4.3 Considerações gerais

As medições de campo mostram que a concentração de sedimento em suspensão está sempre acima de um valor em torno de 0.006 kg/m^3 . Isto indica que uma fração com granulometria muito fina está disponível. Este sedimento é tão fino e tem uma velocidade de queda tão baixa que nunca irá se depositar neste ambiente. Por outro lado, sabe-se, das amostras de fundo, que uma fração mais grossa também está disponível. Esta fração tem uma velocidade de queda maior e é erodida e depositada a cada ciclo de maré. A fração fina está praticamente sempre em suspensão e só reagirá a mudanças em longo termo na hidrodinâmica. A concentração máxima medida é de 0.065 kg/m^3 .

As amostras de fundo mostram que o leito perto da entrada é constituído principalmente por areia fina e silte, enquanto que mais para o interior do estuário o leito é de lama e silte. Isto também está indicado nas fotos de satélite da área. Do ponto de vista da modelagem isto não tem uma grande influência na distribuição, uma vez que lama ou silte estão presentes em todos os lugares. Porém em relação à capacidade de erosão isto desempenha um papel importante e a capacidade de erosão tem de ser fixada adequadamente.

Em relação à descrição do sedimento de fundo no canal de acesso, é necessário se ter várias camadas de sedimento. A primeira camada será modelada como sedimento recém depositado e que erode facilmente. Isto significa que no final das contas a sedimentação resultante será zero se nada mais for feito. Porém, é um fato que a deposição ocorre no canal. Acredita-se que o sedimento recém depositado aumenta gradualmente a força devido à consolidação, à mistura de areia e lama e a vários outros processos. Para incluir isto foi introduzida uma segunda camada. Esta camada tem propriedades de erosão que segurarão uma quantidade apropriada do sedimento capturado, para atingir a sedimentação correta. Para poder mover sedimento para esta segunda camada foi implementada uma função de transferência. Ela move sedimento da camada 1 para a camada 2 abaixo. Isto é consistente com o que acontece na natureza, onde uma camada mais forte é lentamente construída abaixo da camada superior mais fraca.

Ao largo haverá um efeito de grandes ondas oceânicas viajando em direção à costa. Porém as entradas do estuário são relativamente estreitas e abrigadas das direções principais de onda. Por essa razão não haverá penetração de ondas, e as ondas presentes nas partes internas do estuário serão principalmente pequenas ondas geradas pelo vento. Em áreas rasas e abertas estas ondas revolverão o sedimento para cima e induzirão concentrações mais altas. Porém, na área do estudo a maior porção de área rasa está coberta por manguezais densos e outras vegetações. Assim, espera-se que este efeito seja pequeno. As ondas não foram, por esta razão, incluídas nas simulações.



4.4 Montagem do modelo

O modelo foi montado usando-se os parâmetros de entrada a seguir. Veja a Seção 4.1 para uma breve descrição do modelo e das equações importantes.

Tabela 4-1: Parâmetros usados no modelo de transporte de sedimento.

| Parâmetro | Valor |
|--|--|
| Geral | |
| Número de camadas do leito | 2 |
| Número de frações de sedimento | 2 |
| Velocidade de queda | |
| Velocidade de queda (w_s) fração 1 | 0.001 m/s |
| Velocidade de queda (w_s) fração 2 | 0.00001 m/s |
| Deposição | |
| Tensão de cisalhamento crítica para deposição (τ_{cd}) fração 1 | 0.07 N/m ² (Ver Figura 4-6) |
| Tensão de cisalhamento crítica para deposição (τ_{cd}) fração 2 | 0.02 N/m ² (Ver Figura 4-7) |
| Erosão | |
| Tensão de cisalhamento crítica para erosão (τ_{ce}) camada 1 | 0.1 N/m ² |
| Tensão de cisalhamento crítica para erosão (τ_{ce}) camada 2 | Mapa (45% da tensão cisalhante) |
| Potência de erosão (n) camada 1 | 1 |
| Potência de erosão (n) camada 2 | 1 |
| Coefficiente de erosão (E) camada 1 | 0.0005 kg/m ² /s |
| Coefficiente de erosão (E) camada 2 | 0.0005 kg/m ² /s |
| Densidade | |
| Densidade (ρ_{sed}) camada 1 | 180 kg/m ³ |
| Densidade (ρ_{sed}) camada 2 | 300 kg/m ³ |
| Rugosidade de fundo | |
| K_n | 0.1m |
| Consolidação | |
| Coefficiente de transição | 0.00001 kg/m ² /s |
| Dispersão | |
| Formulação | Método do coeficiente de dispersão |
| Coefficiente de dispersão | 0.01 |
| Concentrações de sedimento nos contornos abertos | |
| Fração 1 | 0.02 kg/m ³ |
| Fração 2 | 0.01 kg/m ³ |
| Concentrações de sedimento nos rios | |
| Concentrações fonte fração 1 | 0.02 kg/m ³ |
| Concentrações fonte fração 2 | 0.00 kg/m ³ |
| Condições iniciais | |
| Espessura da camada 1 | 0 m |
| Espessura da camada 2 | 0 m |
| Concentração fração 1 | Mapa (Ver Figura 4-5) |
| Concentração fração 2 | 0.01 kg/m ³ |

A tensão de cisalhamento crítica para erosão (τ_{ce}) para a camada do leito 2 foi alcançada durante a calibração e está mostrada na Figura 4-4. A hipótese é a de que abaixo da camada de topo há uma camada que está mais ou menos estável para condições hidráulicas normais. Esta camada, então, só é erodida ocasionalmente. Neste caso, a tensão de cisalhamento crítica para erosão (τ_{ce}) para a camada 2 foi calculada como sendo igual a 45% do valor máximo de τ_b calculado durante o período de calibração.

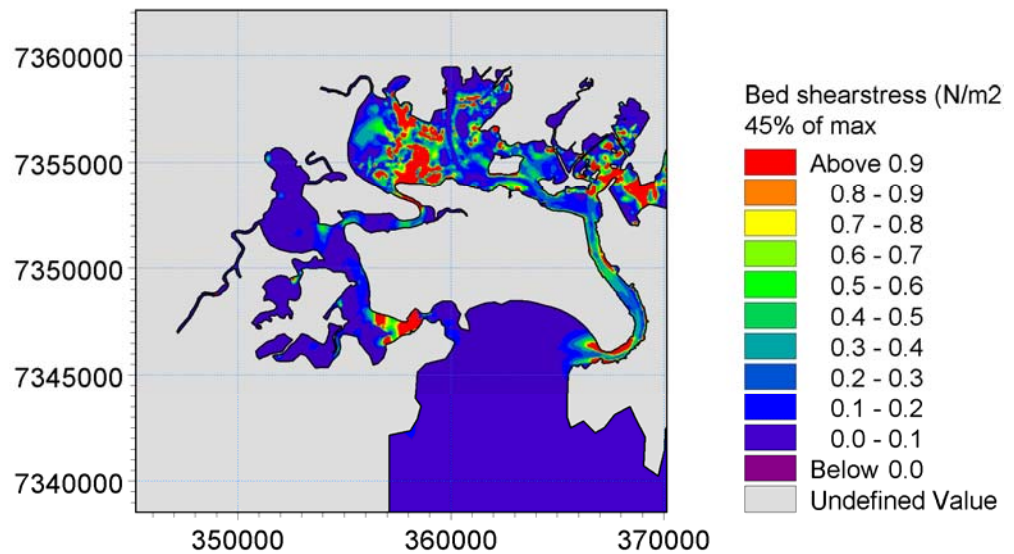


Figura 4-4: Tensão de cisalhamento crítica para erosão (T_{ce}), camada do leito 2.

A disponibilidade de sedimento, ou seja, a quantidade de sedimento que está disponível para erosão é um fator importante para a calibração. Com a montagem atual isto é regulado através de fontes, condições de fronteira e do sedimento já no sistema. Quando os períodos de simulação são tão curtos quanto neste caso e o estuário tão relativamente confinado, a disponibilidade de sedimento será definida principalmente pelas condições iniciais de sedimento em suspensão e pelo sedimento depositado no leito do mar. A hidrodinâmica irá rapidamente estabelecer equilíbrio entre os sedimentos do leito e em suspensão na coluna de água. O objetivo é ter a quantidade correta de sedimento no sistema desde o princípio. Neste caso, foi escolhido usar a concentração na coluna de água como condição inicial. A fração fina reage muito lentamente a mudanças e é então modelada como constante em todas as áreas do modelo, enquanto que a fração grossa é definida por um campo horizontal inicial. Isto está mostrado na Figura 4-5.

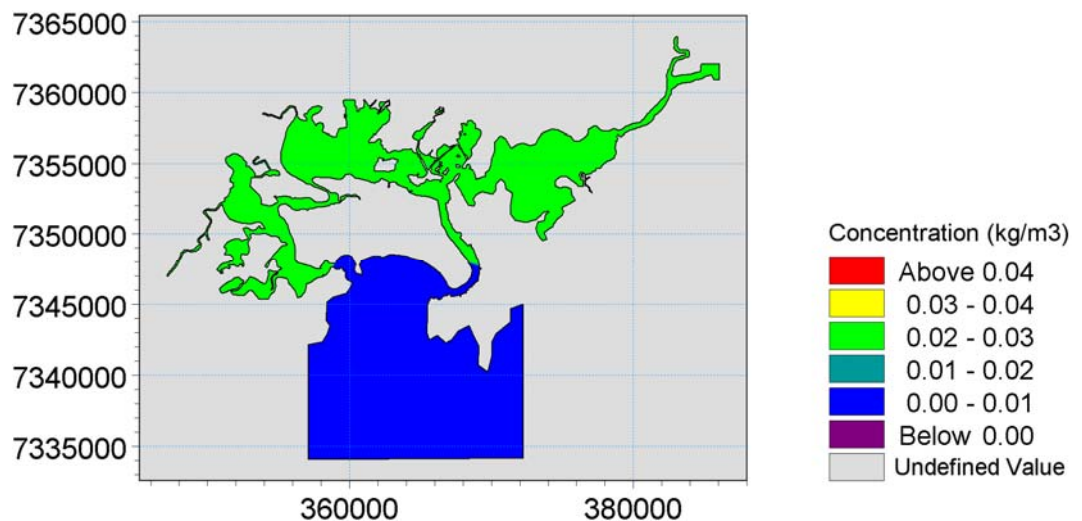


Figura 4-5: Concentração inicial da fração 1 (Verde é 0.03 kg/m³, azul é 0.01 kg/m³).



A tensão de cisalhamento crítica para deposição (τ_{cd}) é um outro parâmetro de calibração importante. As velocidades de queda aplicadas mostram que as frações escolhidas devem ter diferentes parâmetros de deposição. A tensão de cisalhamento crítica para deposição foi escolhida menor para fração 2 (a fração fina) em comparação com a fração 1 (a fração grossa). Também foi levado em conta que as ondas foram omitidas e então o sedimento terá uma tendência a decantar perto da entrada. Na realidade, as ondas fazem com que o sedimento continue em suspensão e assim mantêm um certo nível de concentração na entrada. Sem as ondas, a tensão de cisalhamento crítica para deposição tem que ser tomada como zero fora do estuário, para assegurar que o nível de sedimento seja mantido ao longo de todo o caminho até a entrada do estuário. Os mapas de tensão de cisalhamento crítica para deposição (τ_{cd}) são mostrados na Figura 4-6 e na Figura 4-7.

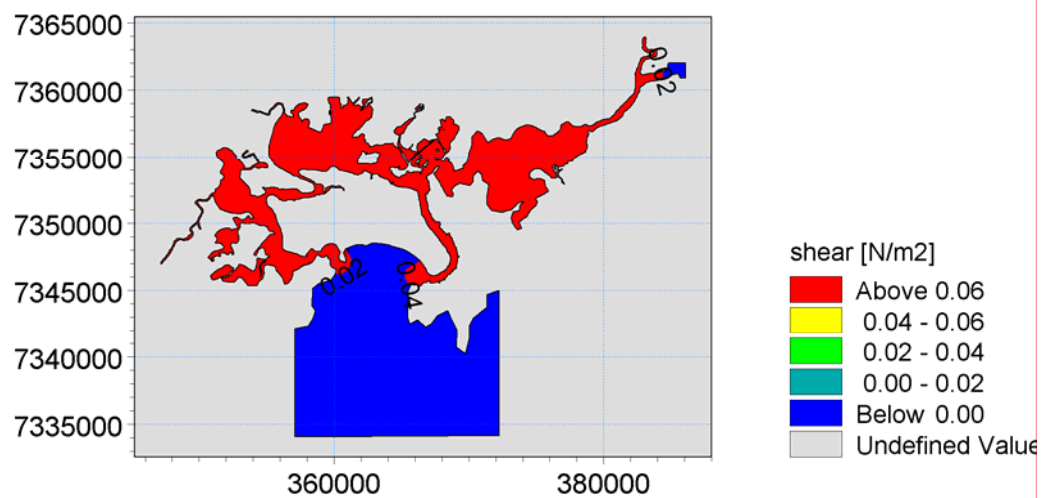


Figura 4-6: Tensão de cisalhamento crítica para deposição (τ_{cd}) fração 1. Vermelho é 0.07 N/m^2 .

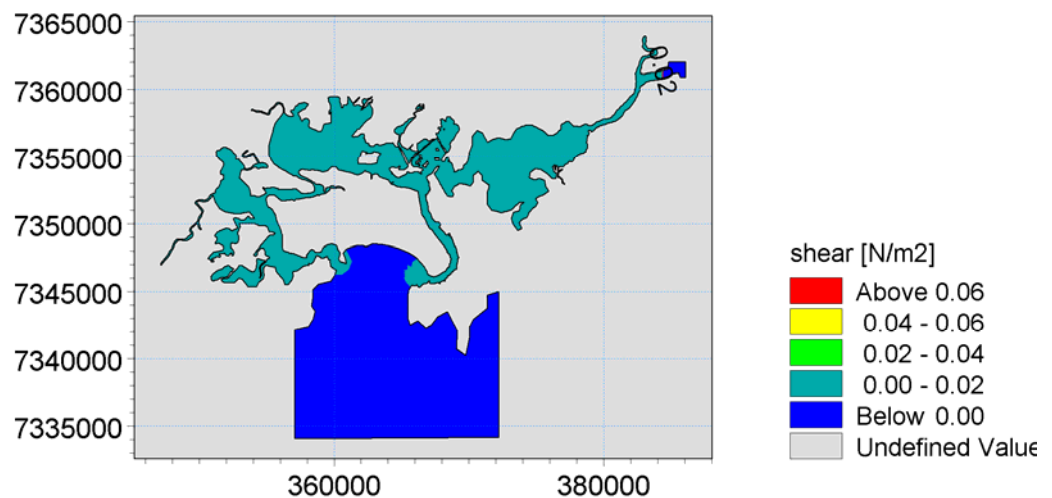


Figura 4-7: Tensão de cisalhamento crítica para deposição (τ_{cd}) fração 2. Verde escuro é 0.02 N/m^2 .



5 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO

Os resultados da calibração são apresentados nas oito figuras a seguir. As figuras mostram as concentrações de sedimento em suspensão medidas em campo como círculos em diferentes cores para o topo e o fundo da coluna de água. As concentrações modeladas são mostradas como séries temporais extraídas nos mesmos pontos em que as medições foram feitas.

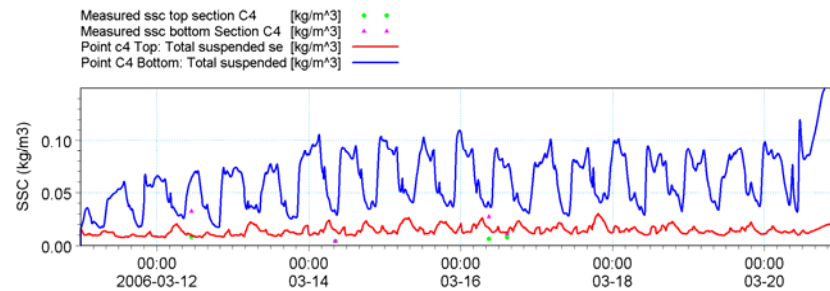


Figura 5-1: Resultados da calibração na seção 4.

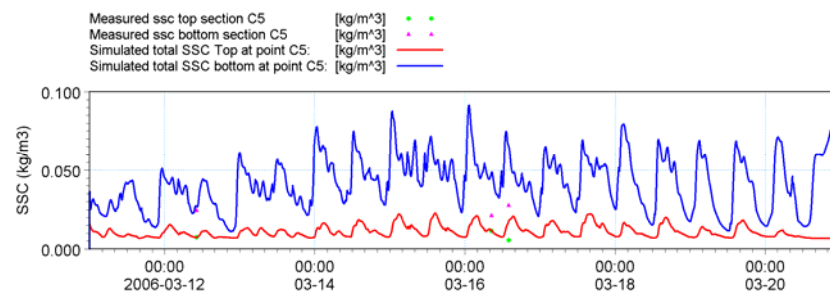


Figura 5-2: Resultados da calibração na seção 5.

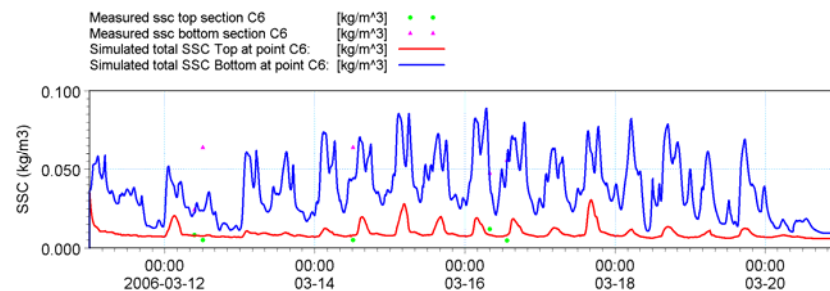


Figura 5-3: Resultados da calibração na seção 6.

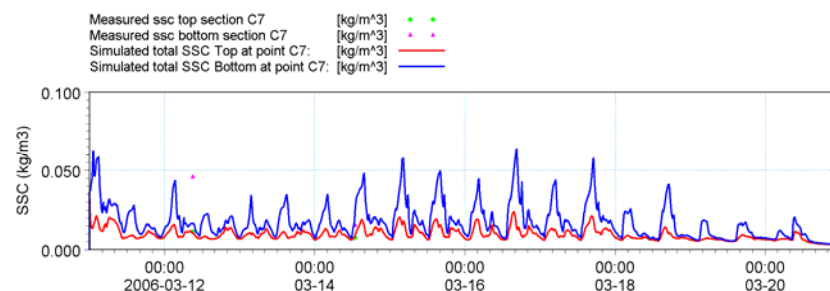


Figura 5-4: Resultados da calibração na seção 7.

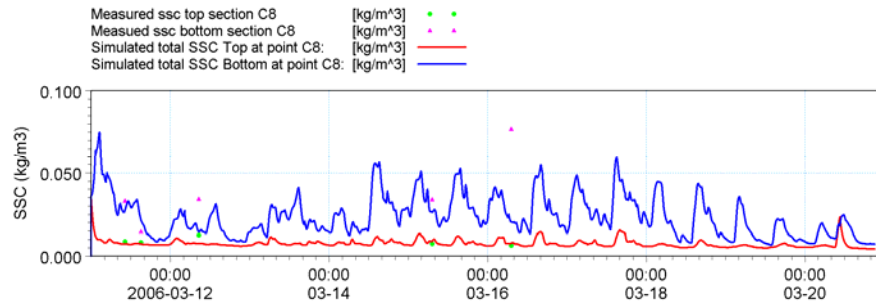


Figura 5-5: Resultados da calibração na seção 8.

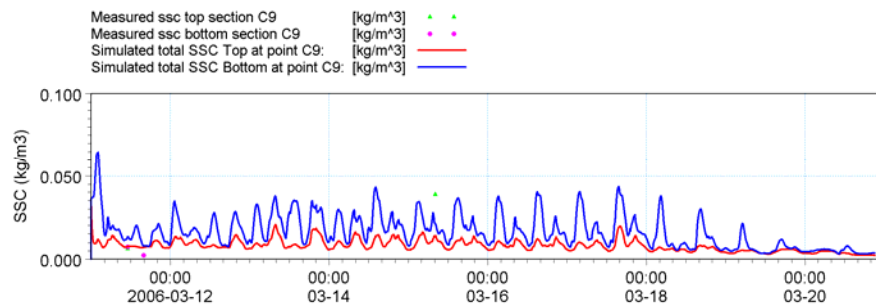


Figura 5-6: Resultados da calibração na seção 9.

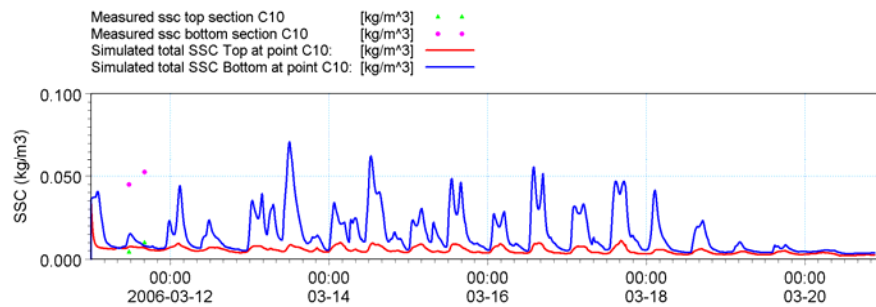


Figura 5-7: Resultados da calibração na seção 10.

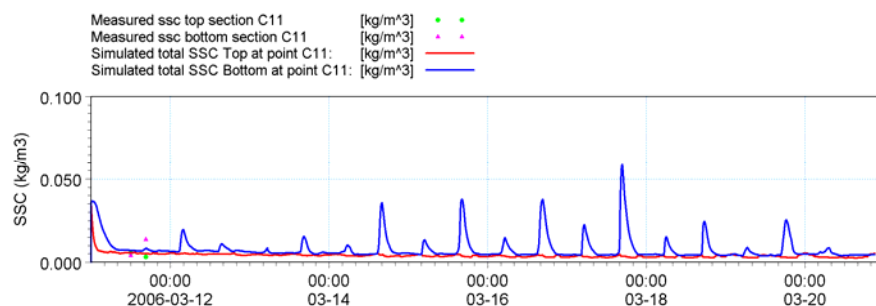


Figura 5-8: Resultados da calibração na seção 11.

Os resultados mostram que a calibração tem a dinâmica correta. Os picos alcançam os níveis corretos em todas as estações. Em todas as estações a concentração superficial está reproduzida corretamente, indicando que a escolha de ter duas frações definidas através de duas velocidades de queda está correta.

No fundo pode-se ver que as concentrações nas seções quatro, cinco e seis estão em boa concordância com as medições. Na seção cinco a concentração de fundo está ligeiramente superestimada na maré de sizígia, mas se ajusta muito bem na maré de quadratu-



ra. Nas outras duas seções a calibração está muito boa. Deve-se notar que para cálculos envolvendo transporte de sedimento coesivo precisão de até 50% são aceitáveis.

Na seção 7, os dois pontos de medições no fundo estão bem reproduzidos e a simulação está de modo geral muito boa.

O Ponto 8 está caracterizado por uma boa concordância entre medições e simulação.

No ponto 9, as medições têm valores muito baixos. O modelo não reproduz isto. Porém, olhando para os pontos vizinhos (10 e 8) parece que os valores medidos estão demasiadamente baixos nesse ponto, o que pode indicar alguma problema. Isto é confirmado pelo fato de que uma das medições superficiais é quase 0.04 kg/m^3 , que é 4-5 vezes maior do que em qualquer outro lugar no estuário.

O ponto 10 e o ponto 11 estão ambos localizados na parte superior do canal. A concentração de sedimento aqui é dominada por sedimento fino em suspensão movendo-se em torno da área. O modelo reproduz isto, mas o tempo está ligeiramente defasado. Há um grande número de fontes na redondeza, o que pode explicar essa defasagem temporal.

De maneira geral pode-se concluir que a calibração está boa e o modelo montado pode ser usado para os cálculos com os próximos cenários. O padrão de deposição após a calibração e de 14 dias de simulação está mostrado na Figura 5-9.

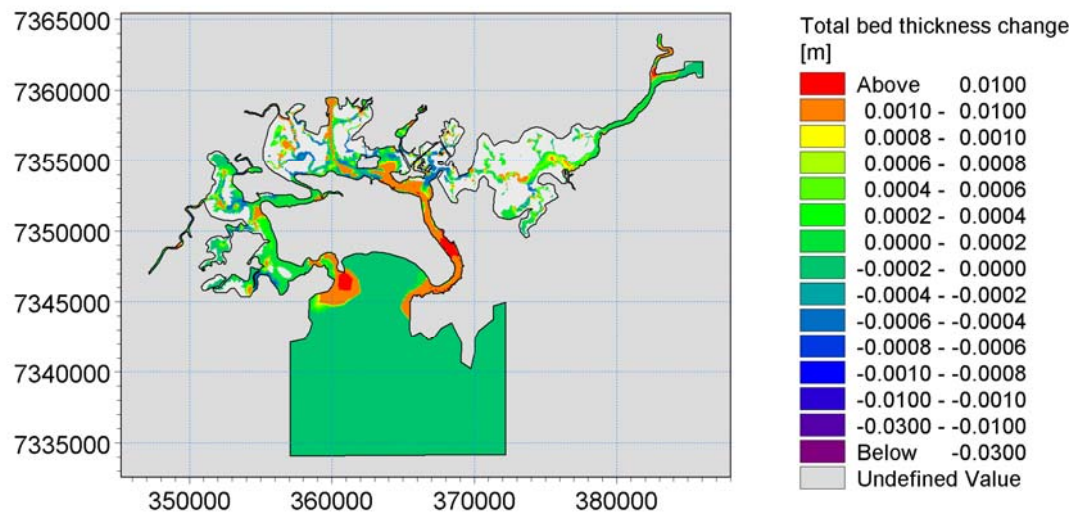


Figura 5-9: Mudança na espessura total do leito após o período de calibração assumindo-se uma densidade do leito de 180 kg/m^3 para a camada 1 e 300 kg/m^3 para a camada 2.



6 ABORDAGEM E ESCOLHA DE CENÁRIOS

A escolha de cenários segue as definições dadas no relatório hidrodinâmico (Ref. /1 /). Os cenários estão apresentados na Tabela 6-1.

Tabela 6-1: Cenários que definem combinações de contribuição fluvial e ressaca marítima externa.

| Nome | Contribuição Fluvial | Ressaca Marítima | Arranjo |
|-----------|----------------------|------------------|------------------|
| Cenário 1 | Máx | Pequena | Arranjo original |
| Cenário 2 | Médio | Pequena | Arranjo original |
| Cenário 3 | Máx | Pequena | Arranjo dragado |
| Cenário 4 | Médio | Pequena | Arranjo dragado |
| Cenário 5 | Máx | Máx | Arranjo original |
| Cenário 6 | Médio | Máx | Arranjo original |
| Cenário 7 | Máx | Máx | Arranjo dragado |
| Cenário 8 | Médio | Máx | Arranjo dragado |

6.1 Mudanças na intrusão salina

A intrusão salina foi investigada para os cenários 1-8 definidos acima. O modelo hidrodinâmico consiste de cinco camadas de água organizadas como camadas sigma (veja Ref. /1 / para detalhes). A salinidade na camada de fundo para os diferentes cenários foi obtida e está plotada na Figura 6-1. As figuras mostram a intrusão salina máxima identificada em cada um dos cenários. Deve-se notar que os desenhos não mostram a mesma data, mas a data identificada de intrusão salina máxima.

A análise mostra que a intrusão salina no estuário é muito diversa. Os cenários 2, 4, 6 e 8 (aqueles com contribuição fluvial média) mostram salinidades de quase até 30 EPS ao longo do estuário. Por outro lado, quando contribuições maiores de água doce dos rios ocorrem (Cenários 1, 3, 5 e 7) a intrusão de água com alta salinidade só chega até próximo a bacia de evolução.

O ponto importante neste contexto, no entanto, não são as características da intrusão da cunha salina entre diferentes condições climáticas, uma vez que esta diversidade já ocorre no estuário de Santos. O escopo aqui é ver as diferenças entre a situação atual e a situação após a dragagem ter sido completada. Os cenários relevantes estão colocados lado a lado na Figura 6-1 para uma comparação direta. Percebe-se que a dragagem tem apenas uma influência limitada na intrusão salina. A variabilidade natural da distribuição da cunha salina é várias ordens de grandeza maior do que aquela induzida pelo aprofundamento do canal.

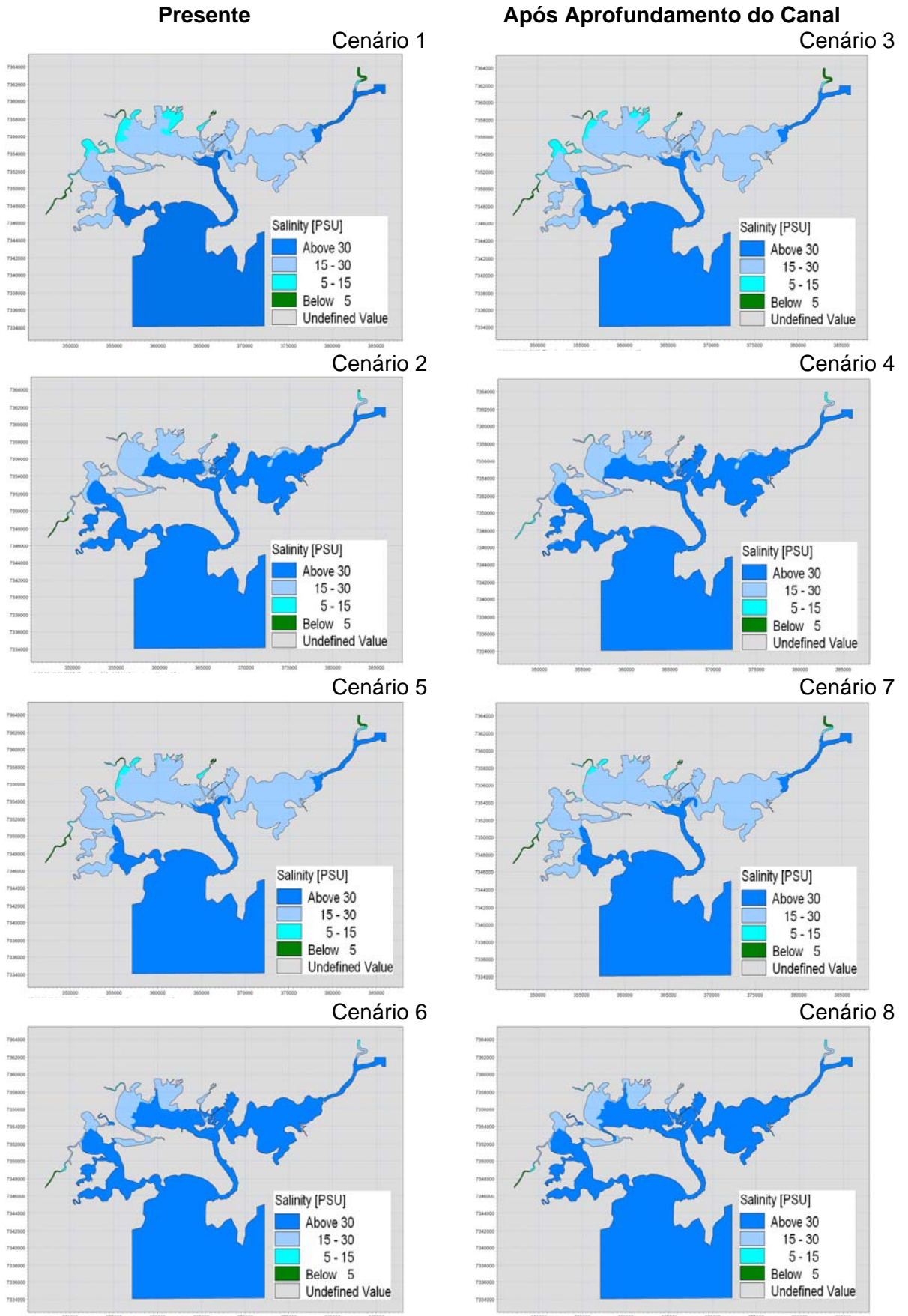


Figura 6-1: Intrusão salina máxima para os cenários 1-8.



6.2 Mudanças na dinâmica do sedimento

O objetivo é determinar as diferenças em sedimentação em várias subáreas predefinidas. Estas regiões são apresentadas na Figura 6-2. Para cada uma das áreas de 1 a 9, o balanço de sedimento foi determinado a partir dos resultados do modelo.

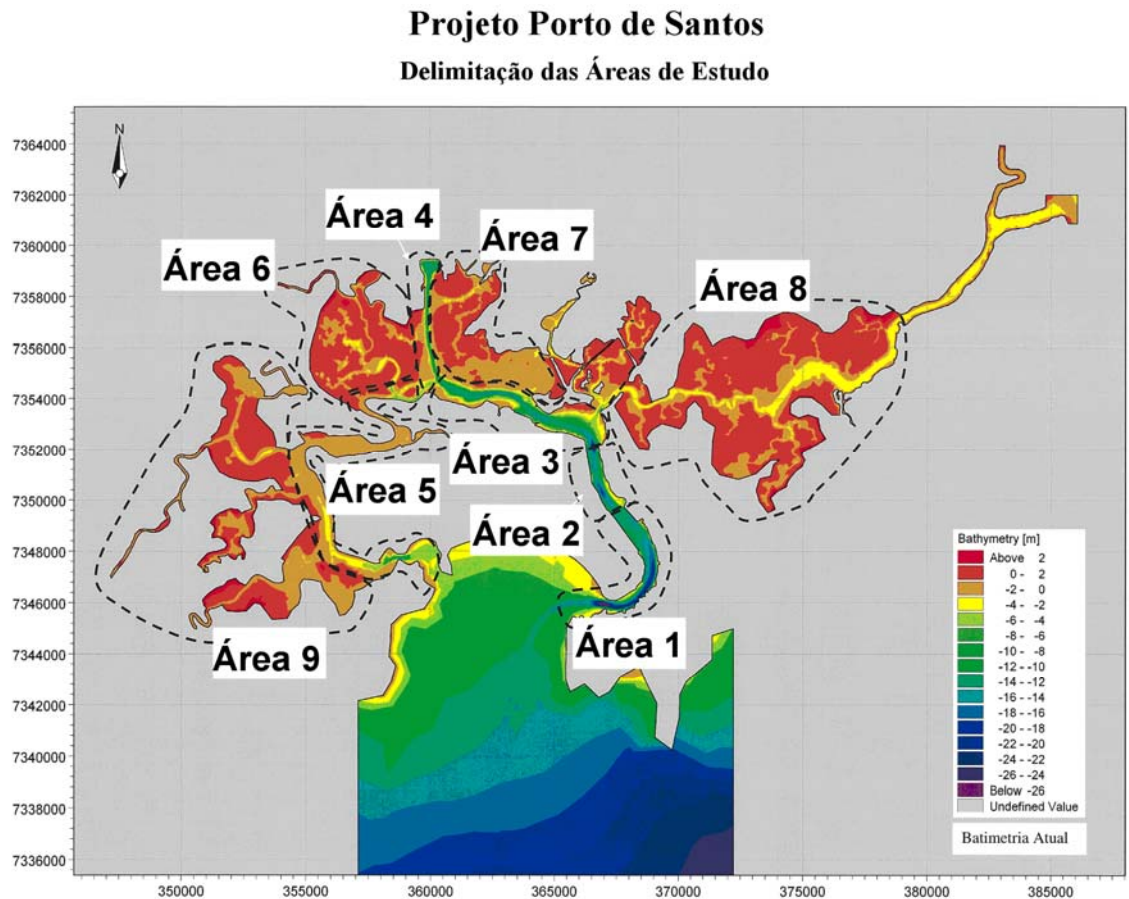


Figura 6-2: Definição das áreas usadas nas análises de sedimentação.

A mudança no balanço de sedimento foi determinada pela comparação dos resultados do modelo antes e após o aprofundamento do canal.

Os resultados foram analisados para cada cenário e os resultados combinados para dar uma taxa anual de sedimentação em cada cenário. Para fazer isto foi dado a cada cenário um peso, baseado na ocorrência anual do respectivo cenário.



7 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES EM MODELO

7.1 Resultados gerais

Na Tabela 7-1 está fornecida a quantidade de sedimento depositada em cada uma das nove áreas definidas (veja a Figura 6-2 para as definições das áreas). Os resultados mostram que no geral há uma tendência de deposição no estuário. Isto é consistente com os processos gerais estuarinos de assoreamento por sedimentos do oceano e dos rios.

Tabela 7-1 Massa erodida em cada área de teste definida após 14 dias [tonelada] (valores positivos indicam deposição).

| | Balanço da Massa de Sedimento [toneladas] | | | | | | | | |
|------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Área 1 | Área 2 | Área 3 | Área 4 | Área 5 | Área 6 | Área 7 | Área 8 | Área 9 |
| Cenário 1 | 14000 | 900 | 6000 | 2300 | 1700 | 2000 | 4700 | 5700 | 2900 |
| Cenário 2 | 4300 | 40 | 650 | 1300 | 1600 | 2000 | 2400 | 4300 | 2500 |
| Cenário 3 | 16500 | 1200 | 6800 | 1400 | 1100 | 1600 | 4200 | 4600 | 2800 |
| Cenário 4 | 4800 | 120 | 2300 | 900 | 2000 | 1100 | 2500 | 3800 | 2300 |
| Cenário 5 | 18000 | 1500 | 6300 | 2000 | 2000 | 2100 | 4500 | 6300 | 3500 |
| Cenário 6 | 7800 | 400 | 1000 | 1100 | 2500 | 1800 | 2300 | 4700 | 3100 |
| Cenário 7 | 19500 | 1900 | 8700 | 1300 | 1800 | 1700 | 4500 | 5800 | 3500 |
| Cenário 8 | 8500 | 500 | 2400 | 700 | 2300 | 1500 | 2500 | 4600 | 3100 |

Estes resultados também mostram que há uma variação grande nas quantidades que podem se depositar nos cenários individuais. Para os cenários com contribuição fluvial máxima as quantidades depositadas são maiores do que nos cenários com contribuição normal. Isto se deve ao fato de que uma grande contribuição fluvial também provê uma grande contribuição de sedimento dos rios.

Na Figura 7-1 é apresentado um exemplo dessa contribuição fluvial. A figura mostra a velocidade na superfície e no fundo para uma posição entre as seções 6 e 8 do canal. Os resultados mostram que uma contribuição fluvial volumosa causa um aumento na velocidade superficial. Por outro lado, a velocidade de fundo diminui em relação ao cenário com contribuição normal. Conseqüentemente, a tensão de cisalhamento e a erosão também diminuem comparativamente. Dessa maneira, o período de tempo durante o qual a tensão de cisalhamento fica baixa o bastante para o sedimento se depositar é maior para o cenário com alta contribuição fluvial, indicando maior deposição. Essa característica é interessante uma vez que nessa situação (alta descarga fluvial) há maior fluxo fluvial, mas nesse caso, a água deixa o estuário pelas camadas superiores da coluna d'água, enquanto que no fundo o fluxo é menor, o que aumenta a deposição sedimentar.

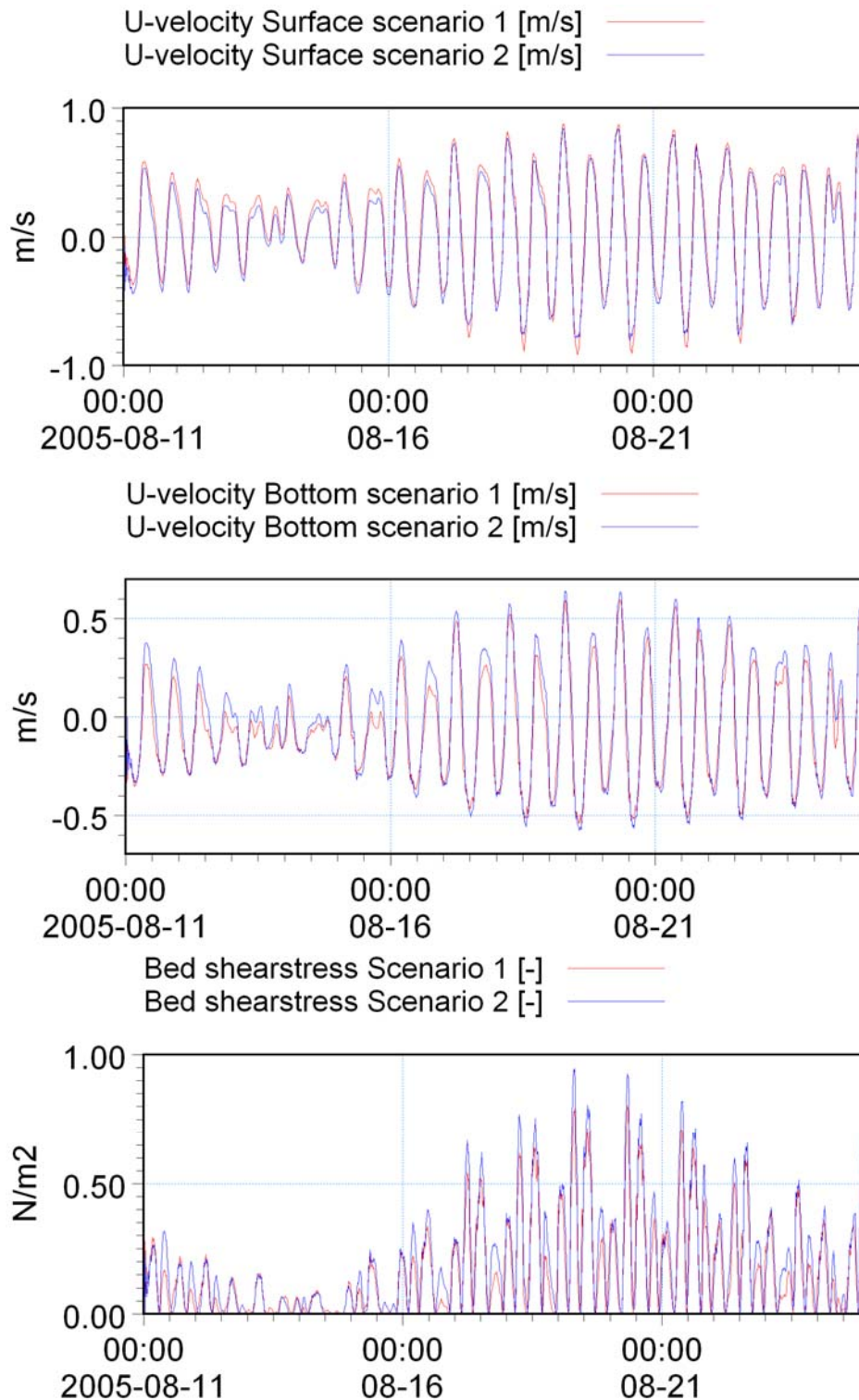


Figura 7-1: Velocidades e tensões de cisalhamento no canal numa posição entre as seções 6 e 8.

Na região interna do estuário esse efeito é menos evidente devido a menor influencia da cunha salina. Os efeitos descritos anteriormente também podem ser vistos nos desenhos de deposição mostrados na Figura 7-2 até a Figura 7-9. Pode-se perceber que o efeito é maior nos canais onde estão as grandes profundidades e a maior estratificação, e menor nas áreas rasas. Podem ser vistas ainda grandes diferenças especialmente nas partes ex-



teriores do estuário. Na Tabela 7-2 são apresentadas as mudanças relativas na sedimentação entre cenários comparáveis.

Tabela 7-2: Mudanças nas sedimentações para cenários comparáveis. Os valores indicam a mudança na deposição para cada uma das áreas de massa definidas devido à dragagem. Valores positivos indicam aumento de deposição (As áreas 1-9 indicam as nove áreas onde a acumulação de sedimento foi calculada (veja Figura 6-2)).

| | Mudança relativa na sedimentação | | | | | | | | |
|-------------|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Área 1 | Área 2 | Área 3 | Área 4 | Área 5 | Área 6 | Área 7 | Área 8 | Área 9 |
| Cenário 1-3 | 17.9% | 33.3% | 13.3% | -39.1% | -35.3% | -20.0% | -10.6% | -19.3% | -3.4% |
| Cenário 2-4 | 11.6% | 200% | 254% | -30.8% | 25.0% | -45.0% | 4.2% | -11.6% | -8.0% |
| Cenário 5-7 | 8.3% | 26.7% | 38.1% | -35.0% | -10.0% | -19.0% | 0.0% | -7.9% | 0.0% |
| Cenário 6-8 | 9.0% | 25.0% | 140% | -36.4% | -8.0% | -16.7% | 8.7% | -2.1% | 0.0% |

A sedimentação no canal principal (Área 1, Área 2 e Área 3) está em geral aumentando em todos os casos. Isto está relacionado com o aprofundamento e, assim, com as velocidades mais baixas nestas áreas. Para o canal entre a bacia de evolução e a extremidade superior (Área 4) pode-se perceber alguma erosão. Isto tem a ver com o aumento da sedimentação nas outras áreas. Se a quantidade de sedimento na coluna de água na entrada do canal não aumenta, menos sedimento está disponível a montante dessa região. Esse processo fica evidente pela interpretação dos resultados da Tabela 2-1

O canal e a bacia de evolução atuam como um sumidouro e, então, mais sedimento decanta aqui e menos sedimento está disponível a montante. O mesmo mecanismo pode ser visto nas áreas adjacentes. Isto pode ser visto na Figura 7-2 e Figura 7-4, onde um aumento na erosão foi modelado nas vizinhanças do canal.

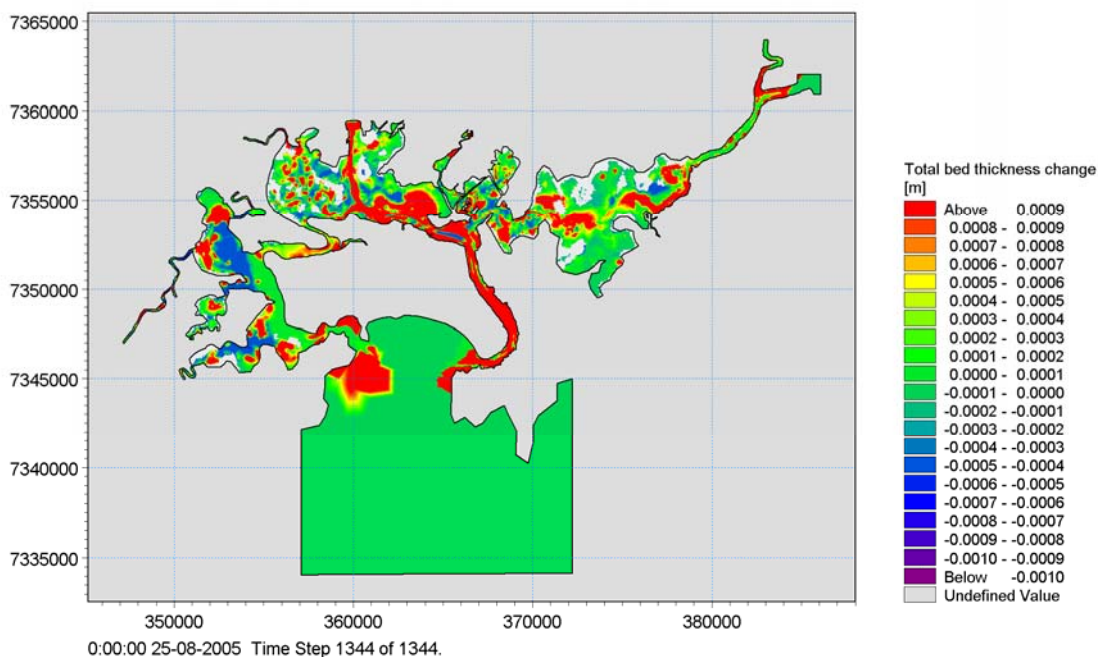


Figura 7-2: Mudança na espessura total do leito após duas semanas para o cenário 1.

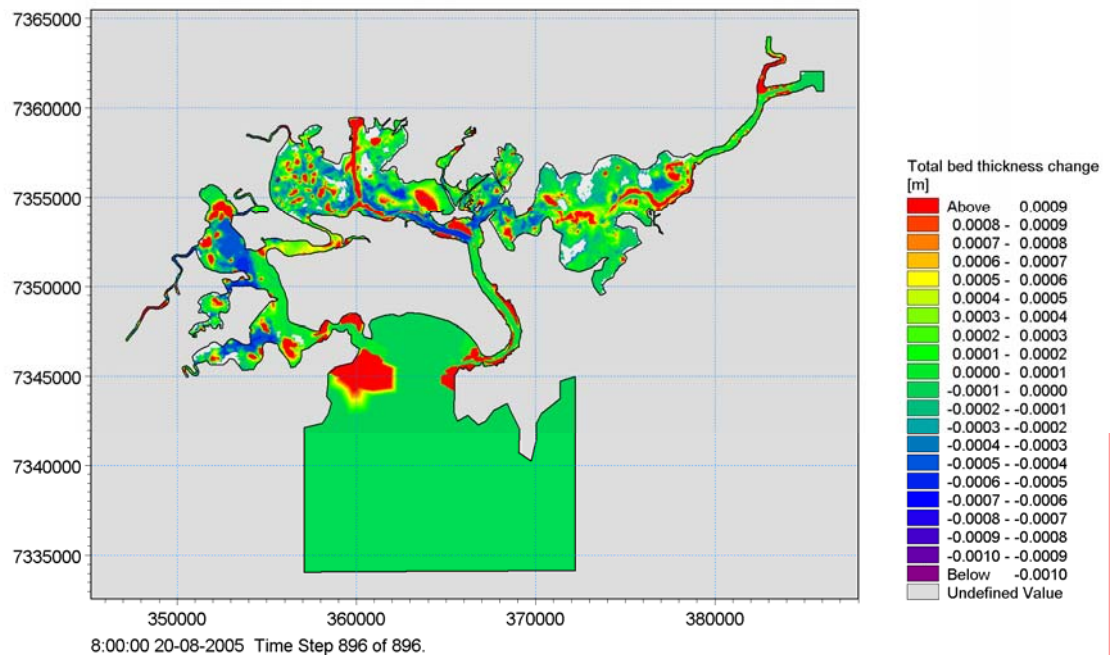


Figura 7-3: Mudança na espessura total do leito após duas semanas para o cenário 2.

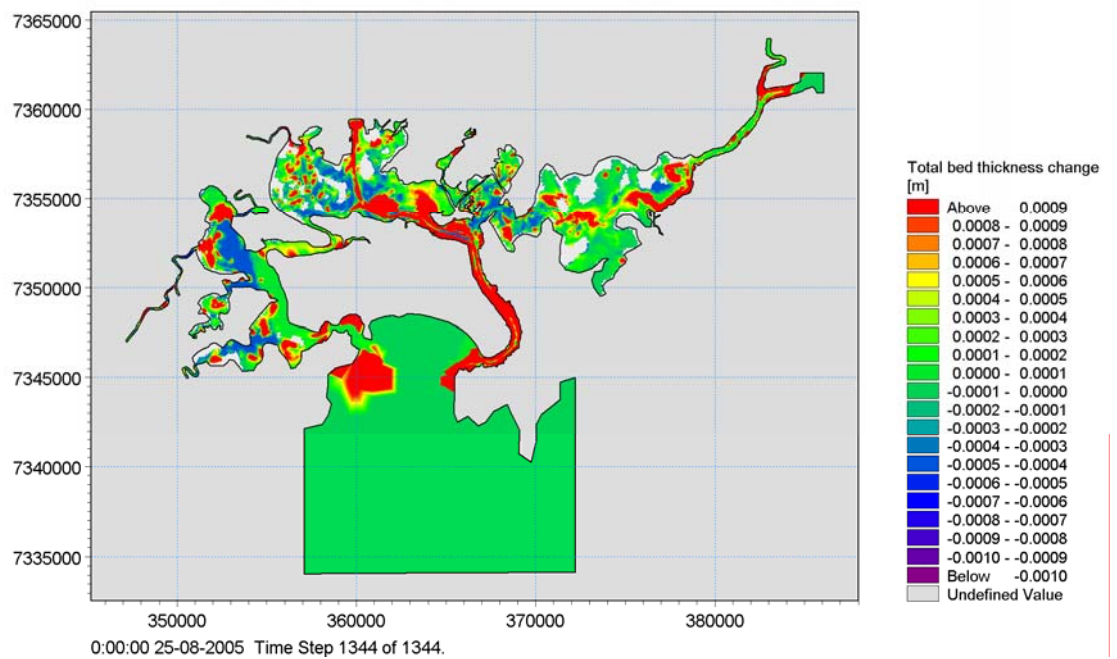


Figura 7-4: Mudança na espessura total do leito após duas semanas para o cenário 3.

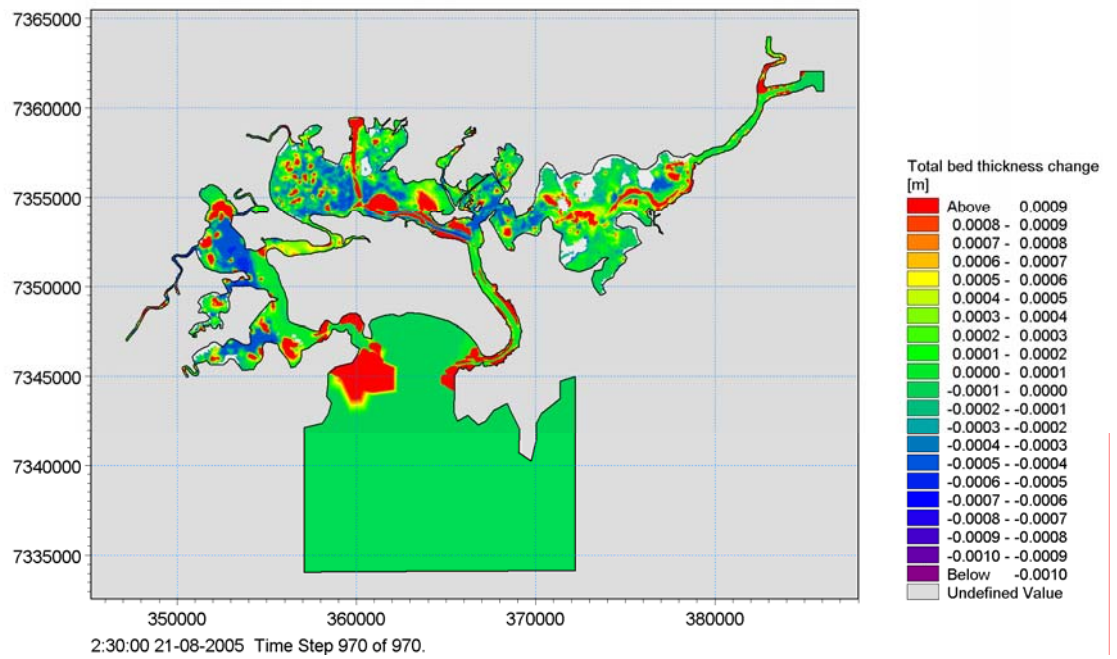


Figura 7-5: Mudança na espessura total do leito após duas semanas para o cenário 4.

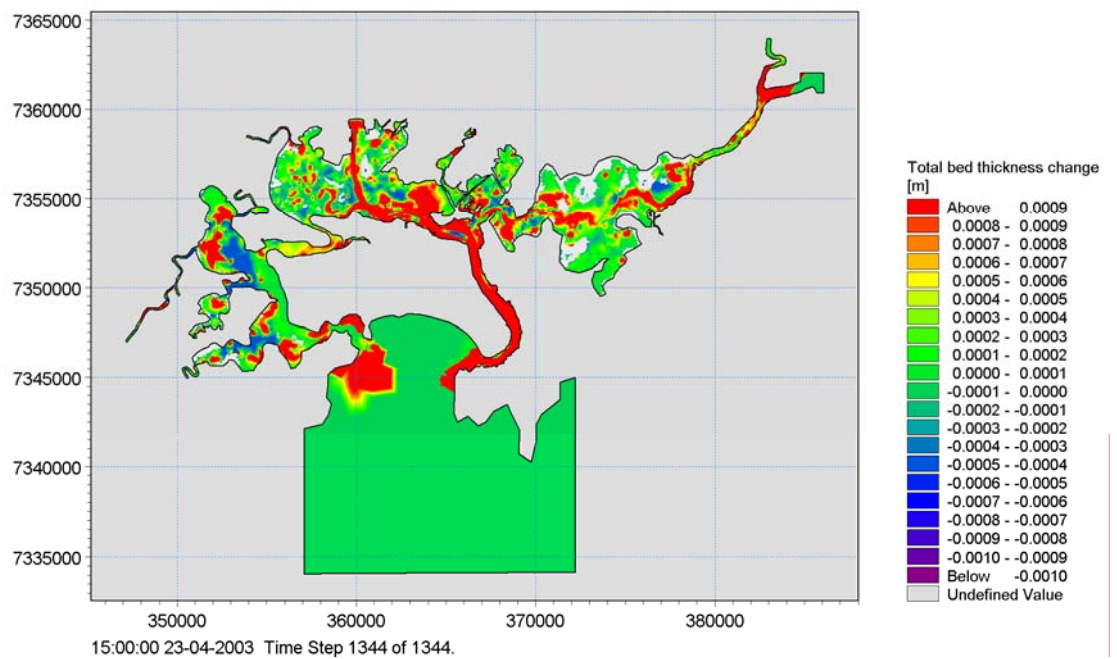


Figura 7-6: Mudança na espessura total do leito após duas semanas para o cenário 5.

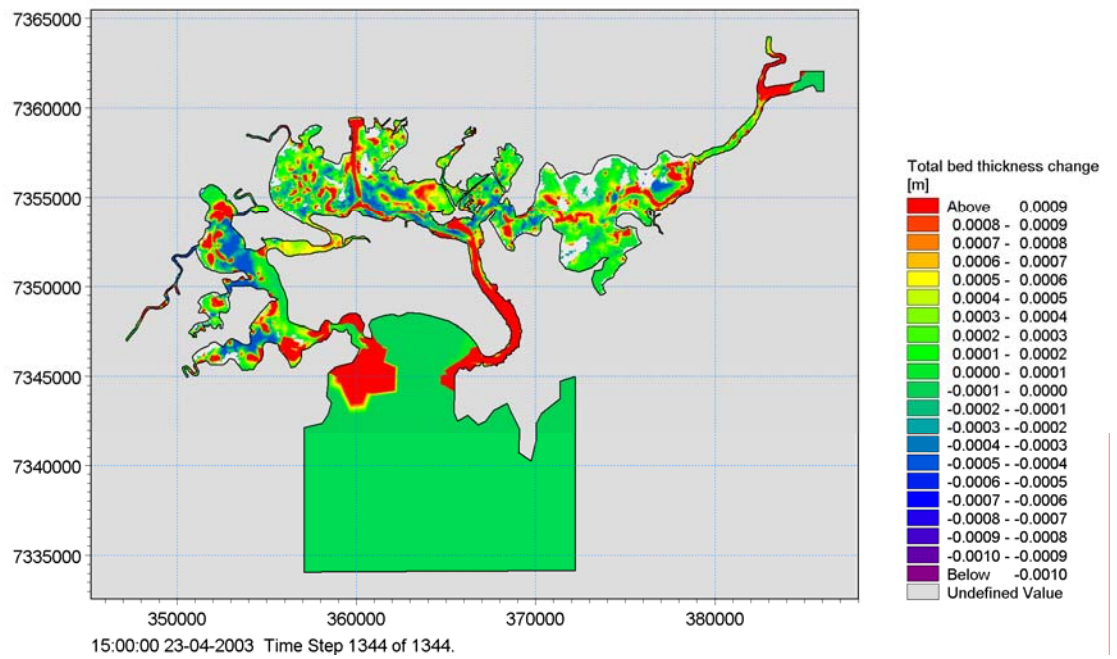


Figura 7-7: Mudança na espessura total do leito após duas semanas para o cenário 6.

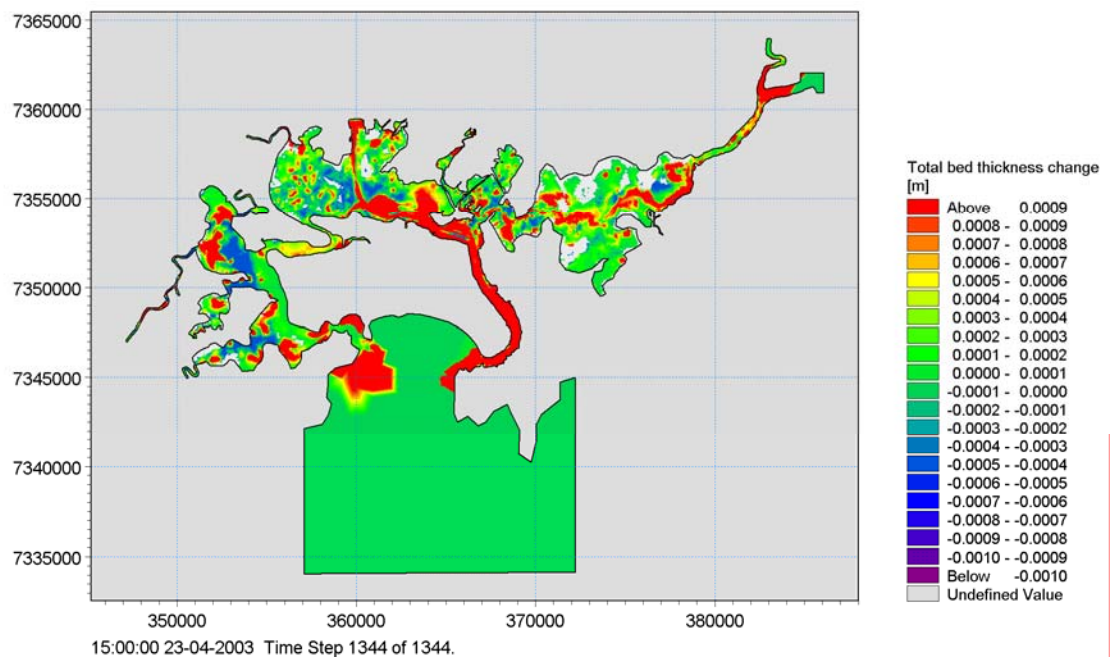


Figura 7-8: Mudança na espessura total do leito após duas semanas para o cenário 7.

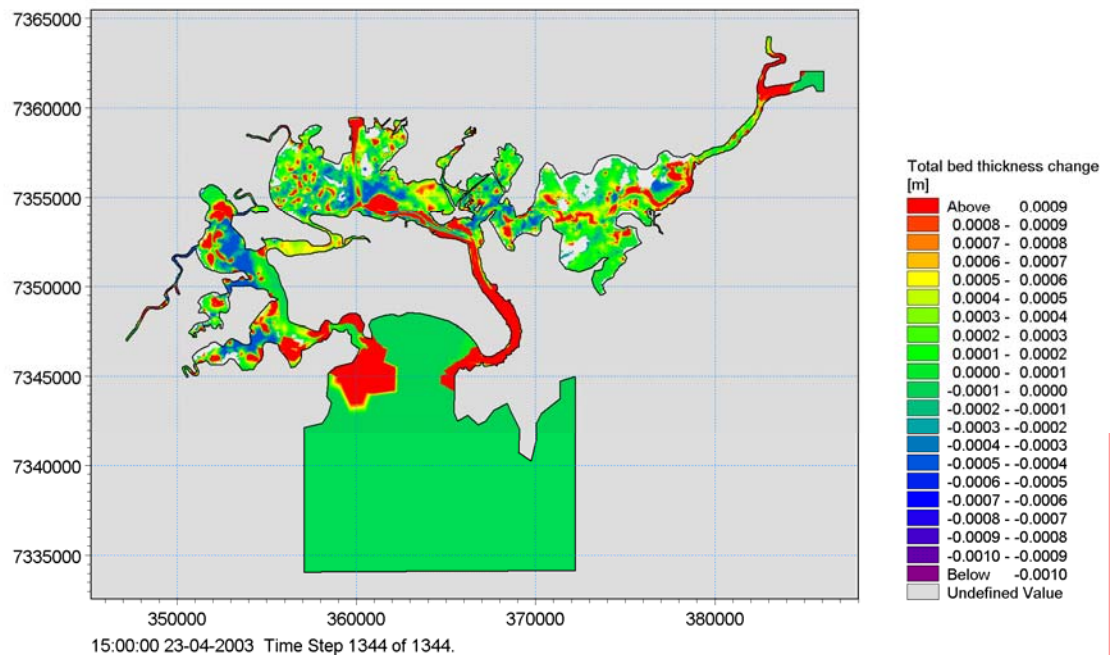


Figura 7-9: Mudança na espessura total do leito após duas semanas para o cenário 8.

As próximas seções descrevem os cenários comparáveis (ou seja, aqueles com a mesma combinação de contribuição fluvial e de ressaca marítima), para obter a influência da dragagem. Os desenhos são mostrados como a diferença entre o cenário sem dragagem (o cenário de referência) e o correspondente cenário com a dragagem (o cenário futuro).

7.2 Impactos na sedimentação entre os cenários 3 e 1

As mudanças na sedimentação entre os cenários 3 e 1 (ambos com contribuição fluvial máx e sem ressaca marítima) estão mostradas na Figura 7-10. O resultado mostra que as maiores diferenças ocorrem nos lados do canal e na bacia de evolução. A mudança na bacia de evolução não é surpresa alguma, uma vez que a lâmina de água aqui aumentou significativamente em comparação a situação antes do aprofundamento. A sedimentação nos lados é devida à mudança na hidrodinâmica dos canais. Em ambos os casos as mudanças são superiores a 1 cm/duas semanas.

Algumas mudanças também são notadas na entrada, devido ao maior prisma de maré. Os padrões de erosão e deposição mudam aqui, o que já era esperado e, provavelmente, estará mudando dinamicamente a toda hora. Isto é consistente com as observações mencionadas para a área da embocadura após eventos de cheia.

Na entrada para o estuário oriental também foi observada uma mudança negativa da ordem de grandeza de -1 cm/duas semanas.

Quase nenhuma mudança foi observada nos manguezais ocidentais, porém a sedimentação está diminuindo nos canais internos, corroborando os resultados obtidos para a área 4.

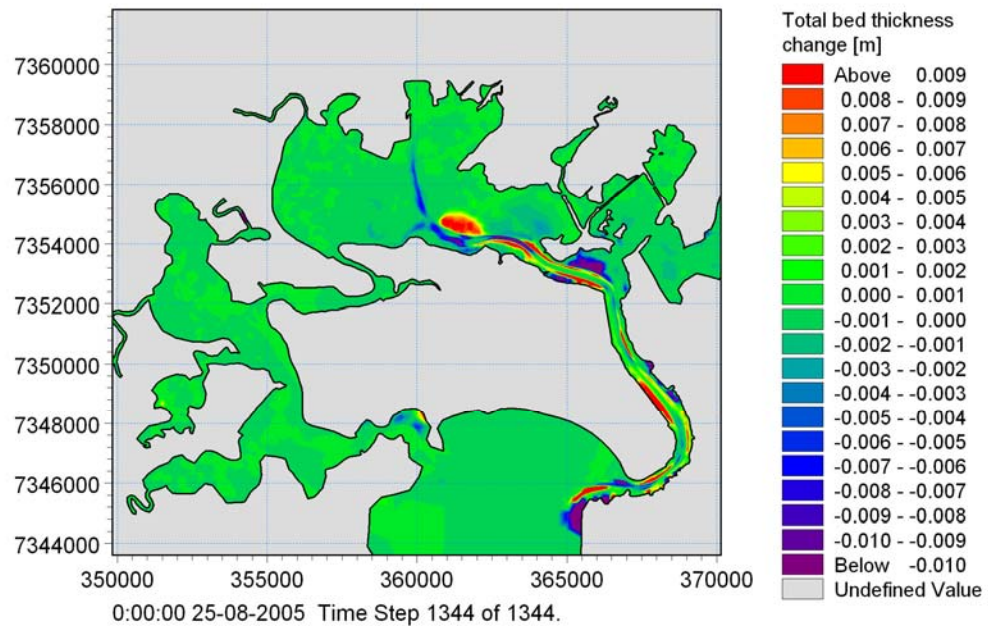


Figura 7-10: Diferença na sedimentação após duas semanas entre os cenários 1 e 3.

7.3 Impactos na sedimentação entre os cenários 4 e 2

As mudanças na sedimentação entre os cenários 4 e 2 (ambos com contribuição fluvial média e sem ressaca marítima) são mostradas na Figura 7-11. As mudanças na sedimentação neste caso são menores do que para a situação com a contribuição fluvial máxima (cf. Seção 7.2). Porém, os padrões são bem parecidos ao que foi visto anteriormente.

A deposição na embocadura mudou, de modo que a deposição ocorre em ambos os lados do canal.

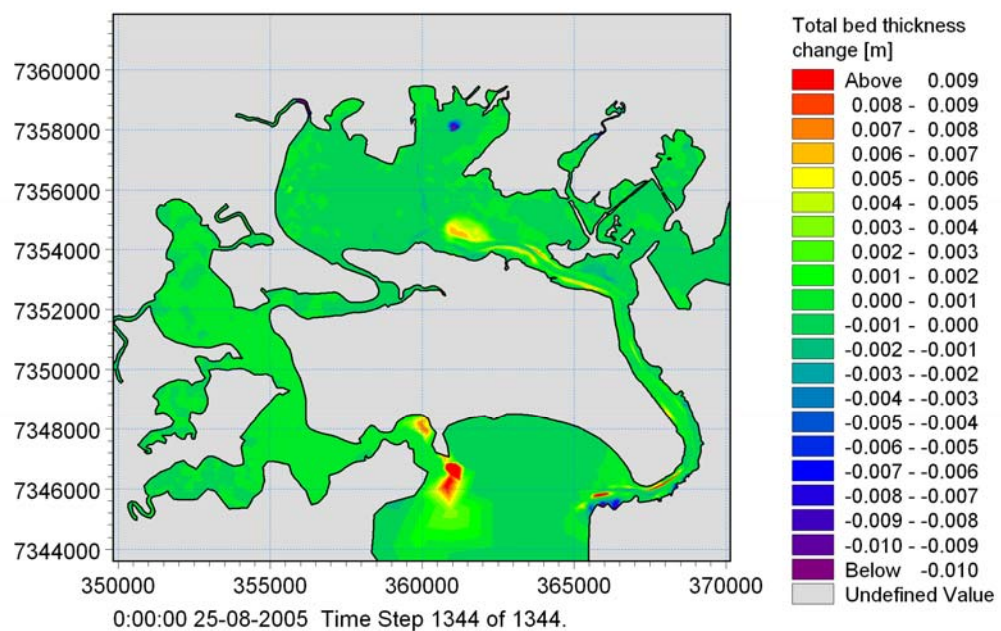


Figura 7-11: Diferença na sedimentação após duas semanas entre os cenários 4 e 2.



7.4 Impactos na sedimentação entre os cenários 7 e 5

Os resultados da diferença entre os cenários 7 e 5 (ambos com contribuição fluvial máx e ressaca marítima) são mostrados na Figura 7-12. A mudança no padrão de sedimentação neste caso é bem parecida àquela entre 3 e 1. Mas neste caso, as mudanças positivas são maiores e as mudanças negativas são menores.

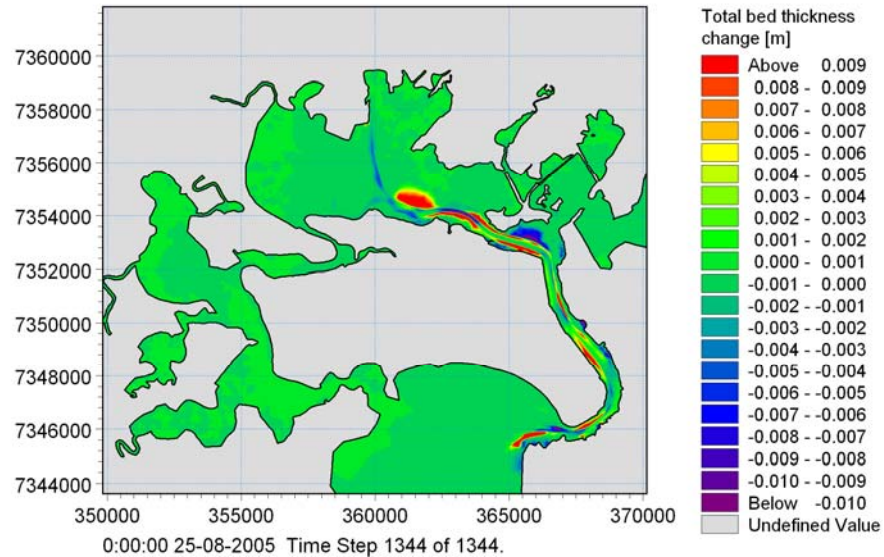


Figura 7-12: Diferença na sedimentação após duas semanas entre os cenários 7 e 5.

7.5 Impactos na sedimentação entre os cenários 8 e 6

As mudanças entre os cenários 8 e 6 (ambos com contribuição fluvial média e ressaca marítima plena) (Figura 7-13), são semelhantes às diferenças entre os cenários 4 e 2, com pequenas mudanças como resultado da dragagem. Porém, neste caso, as mudanças positivas são maiores.

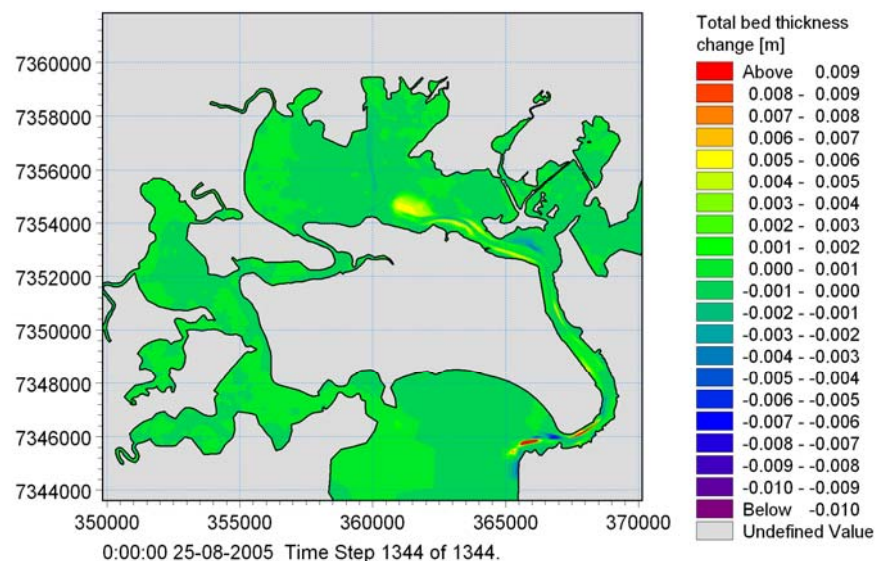


Figura 7-13: Diferença na sedimentação após duas semanas entre os cenários 8 e 6.



7.6 Balanço da sedimentação anual

Para estabelecer um balanço anual de sedimento foi avaliada a ocorrência das diferentes condições meteorológicas. Os cálculos completos estão apresentados no Apêndice A. O tempo em que as diferentes condições ocorrem está apresentado na Tabela 7-3.

Tabela 7-3: Duração das diferentes condições meteorológicas expressas em percentagens.

| Cenário | Tempo de ocorrência |
|---|---------------------|
| Cenários 1 e 3 (Contribuição fluvial máx e sem ressaca marítima) | 23% do tempo |
| Cenários 2 e 4 (Contribuição fluvial média e sem ressaca marítima) | 63% do tempo |
| Cenários 5 e 7 (Contribuição fluvial máx e com ressaca marítima) | 3% do tempo |
| Cenários 6 e 8 (Contribuição fluvial médio e com ressaca marítima) | 11% do tempo |

As sedimentações computadas foram ponderadas com estas percentagens, para a obtenção do balanço anual. Esse escalonamento foi aplicado a cada um dos subdomínios definidos (Áreas 1-9). Isto significa que agora é possível estimar a deposição anual em cada uma das áreas na situação atual e na situação após o futuro aprofundamento. Os resultados estão apresentados na Tabela 7-4.

Foram feitos também testes para avaliar a sensibilidade dos coeficientes de escala utilizados no estudo. A influência da variação de diferentes fatores de escala no cálculo do balanço de sedimento foi analisada (Apêndice A, Tabela 03), apresentando uma variação máxima de cerca de 20%.

Tabela 7-4: Taxas de deposição anual para as subáreas 1-9 definidas. Os números foram ponderados para os diferentes cenários, como explicado no texto. Números positivos indicam deposição.

| | Área 1 | Área 2 | Área 3 | Área 4 | Área 5 | Área 6 | Área 7 | Área 8 | Área 9 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Sedimentação anual [t/ano] sem aprofundamento | 191700 | 8500 | 54800 | 39900 | 45300 | 51600 | 77800 | 123300 | 70100 |
| Sedimentação anual [t/ano] com aprofundamento | 218300 | 12200 | 92500 | 26200 | 47400 | 33400 | 77100 | 107800 | 66100 |
| Aumento relativo na deposição (taxas de dragagem) | 14% | 44% | 69% | -34% | 5% | -35% | -1% | -13% | -6% |

Baseado nos números da Tabela 7-4 pode-se perceber que por causa da dragagem uma quantidade razoavelmente grande de deposição extra ocorreu no canal de acesso principal (Áreas 1 -3). Isto não é surpreendente, já que o aprofundamento irá sempre aumentar a capacidade de captura do sedimento.

Tabela 7-5: Taxas anuais de deposição globais e no canal de acesso principal em tonelada.

| | Canal de acesso principal (Áreas 1-3) | Total (Áreas 1-9) |
|---|--|----------------------|
| Taxa de sedimentação, sem aprofundamento [t/ano] | 256.000 | 663.000 |
| Taxa de sedimentação, com aprofundamento [t/ano] | 323.000 | 680.000 |
| Aumento relativo da deposição (taxas de dragagem) | 26% | 2% |



O modelo numérico computa o transporte de sedimento em tonelada. Ele foi convertido para volumes, usando-se uma densidade típica do sedimento de fundo de 0.35 ton/m^3 . Os volumes de sedimentação são apresentados na Tabela 7-6. Esta tabela fornece uma indicação da precisão do modelo. O cliente informou que anualmente é dragado um total de $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ dentro do canal (Áreas 1-3). Outro $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ seria dragado na região fora do canal. O presente estudo está focalizado apenas na fração de sedimento com granulometria fina (lama), a qual, de acordo com as amostras do leito da embocadura do estuário, compreende aproximadamente 50% do sedimento total. O fato da calibração do modelo ter se ajustado relativamente tão bem às medições de campo de concentrações de sedimento e o fato de que a deposição final no canal de acesso está razoavelmente próxima da taxa anual de dragagem, fazem do modelo uma ferramenta confiável para descrever a dinâmica do sedimento no estuário.

Tabela 7-6: Taxas anuais de deposição globais e no canal de acesso principal em m^3 .

| | Canal de acesso principal (Áreas 1–3) | Total (Áreas 1–9) |
|---|--|----------------------|
| Taxa de sedimentação sem aprofundamento [m^3/ano] | 731.000 | 1.895.000 |
| Taxa de sedimentação com aprofundamento [m^3/ano] | 922.000 | 1.942.000 |

Projeto Porto de Santos

Delimitação das Áreas de Estudo

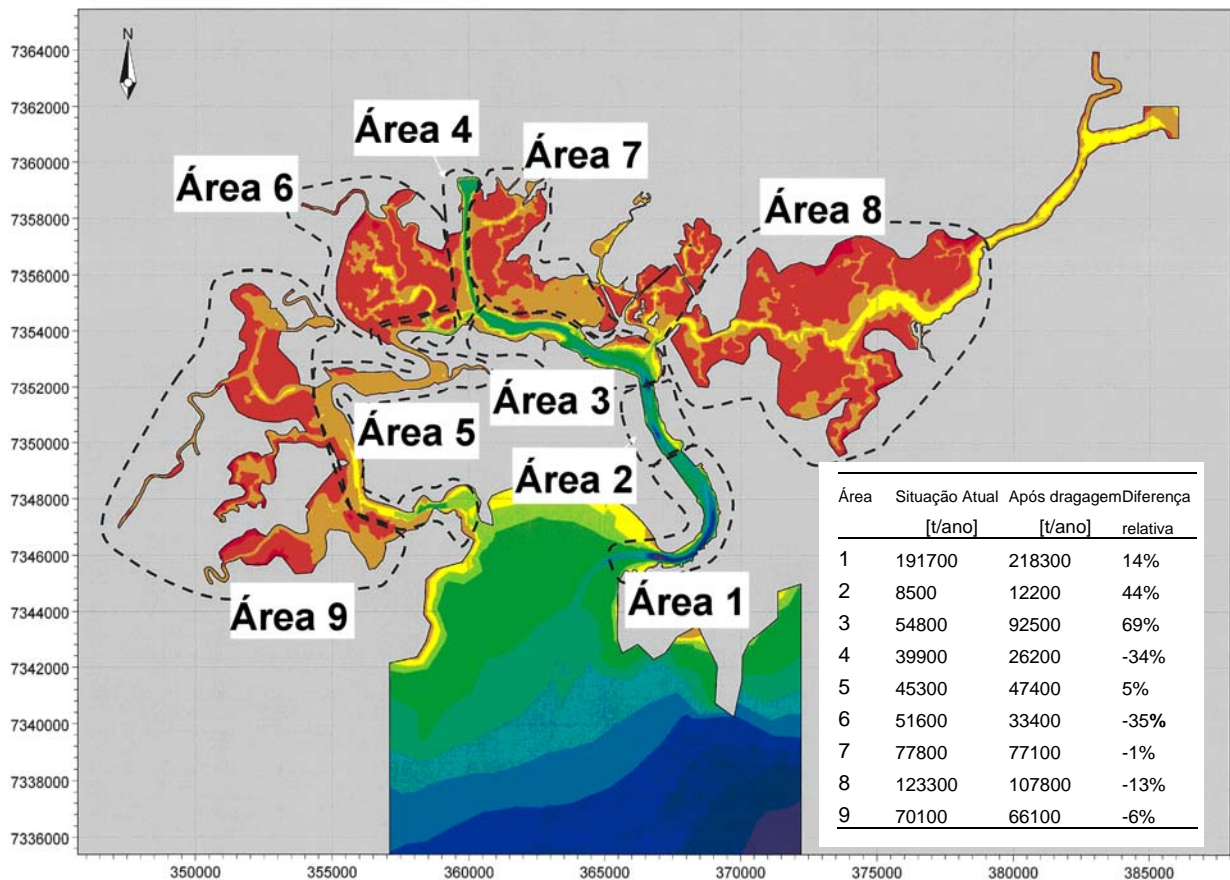


Figura 7-14: Visão geral das taxas de sedimentação. Uma versão maior do desenho está apresentada no Apêndice B.



Os resultados mostram uma pequena diminuição na sedimentação em algumas das áreas de manguezais. É importante enfatizar que esta é uma diminuição nas taxas de sedimentação. Não é uma erosão geral. A erosão pode acontecer muito localmente, mas em geral todas as áreas estão também assoreando após o aprofundamento. Um número geral para o estuário inteiro é um aumento no aporte de sedimento de cerca de 2%. Isto significa que a deposição total de sedimento está agora em aproximadamente 663.000 t/ano e após o aprofundamento este número pode aumentar para algo em torno de 680.000 t/ano. É importante perceber que embora a mudança no aporte seja só de 2%, isto na verdade resulta num aumento total de mais de 16.000 t/ano.

O canal interno (Área 4) mostra uma queda na taxa de sedimentação (Tabela 7-4). Isto é porque a bacia de evolução na Área 3 está agindo como uma armadilha de sedimento. A bacia de evolução simplesmente captura o sedimento, fazendo com que menos sedimento esteja disponível no canal interno. Este também é o caso dos terraços de marés, com manguezais e outras vegetações. Estas áreas irão, em média, experimentar deposição assim como atualmente, mas a uma taxa aproximadamente 11% mais lenta do que a atual. Isto significa que se uma área entre as marés está atualmente crescendo a 2 mm/ano, ela no futuro diminuirá para 1.8 mm/ano.



8 REFERÊNCIAS

/1 / Porto de Santos – Spill assessment, Hydrodynamic modeling. Relatório preparado pelo DHI. Fevereiro de 2008.

/2 / Mehta, A.J., Hayter, E.J., Parker, W.R., Krone, R.B. e Tectter, A.M., 1989. Cohesive sediment transport. I: Process description. Journal of Hydraulic Engineering - ASCE 115 (8), 1076-1093.





A P Ê N D I C E A

Fatores de escala para as condições meteorológicas.



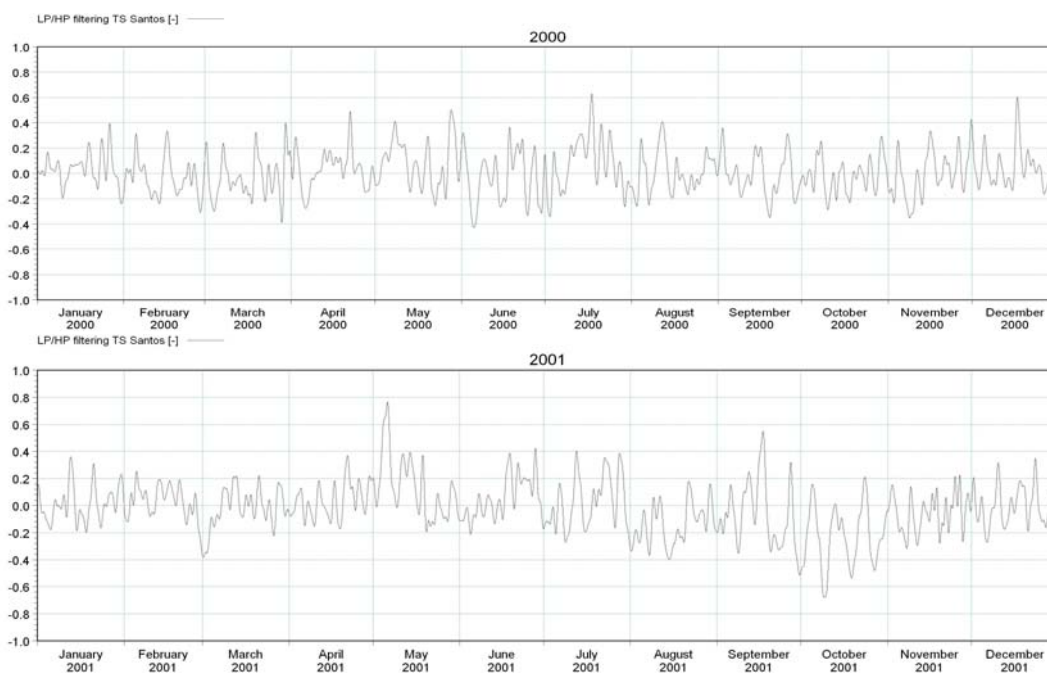
Estimativa do coeficiente de escala para os cenários simulados

Quatro cenários foram utilizados para avaliar o efeito da dragagem no Porto de Santos conforme apresentado no relatório de transporte de lama (Relatório 53773). Os cenários correspondem a um período de 14 dias e para possibilitar o cálculo do balanço de sedimento anual, cada cenário foi pesado de acordo com a relevância de ocorrência para o período de um ano.

Para realizar tal análise, foi calculada a ocorrência de ressacas mensalmente em seis anos, entre 2000 e 2005. A descara fluvial também foi avaliada através dos dados de pluviosidade para o mesmo período. O peso de cada cenário foi calculado pela probabilidade conjunta da ocorrência dos cenários simulados.

1 Quantificação da ocorrência de ressacas

A ocorrência de ressacas foi avaliada pela filtragem em uma rotina *passa baixo* do Mike21 FFT (Fast Fourier Transform) para retirada dos componentes astronômicos, onde foram filtrados os períodos menores que 36hs. As séries temporais filtradas foram consideradas como representativas do nível meteorológico e se encontram nas Figuras abaixo.



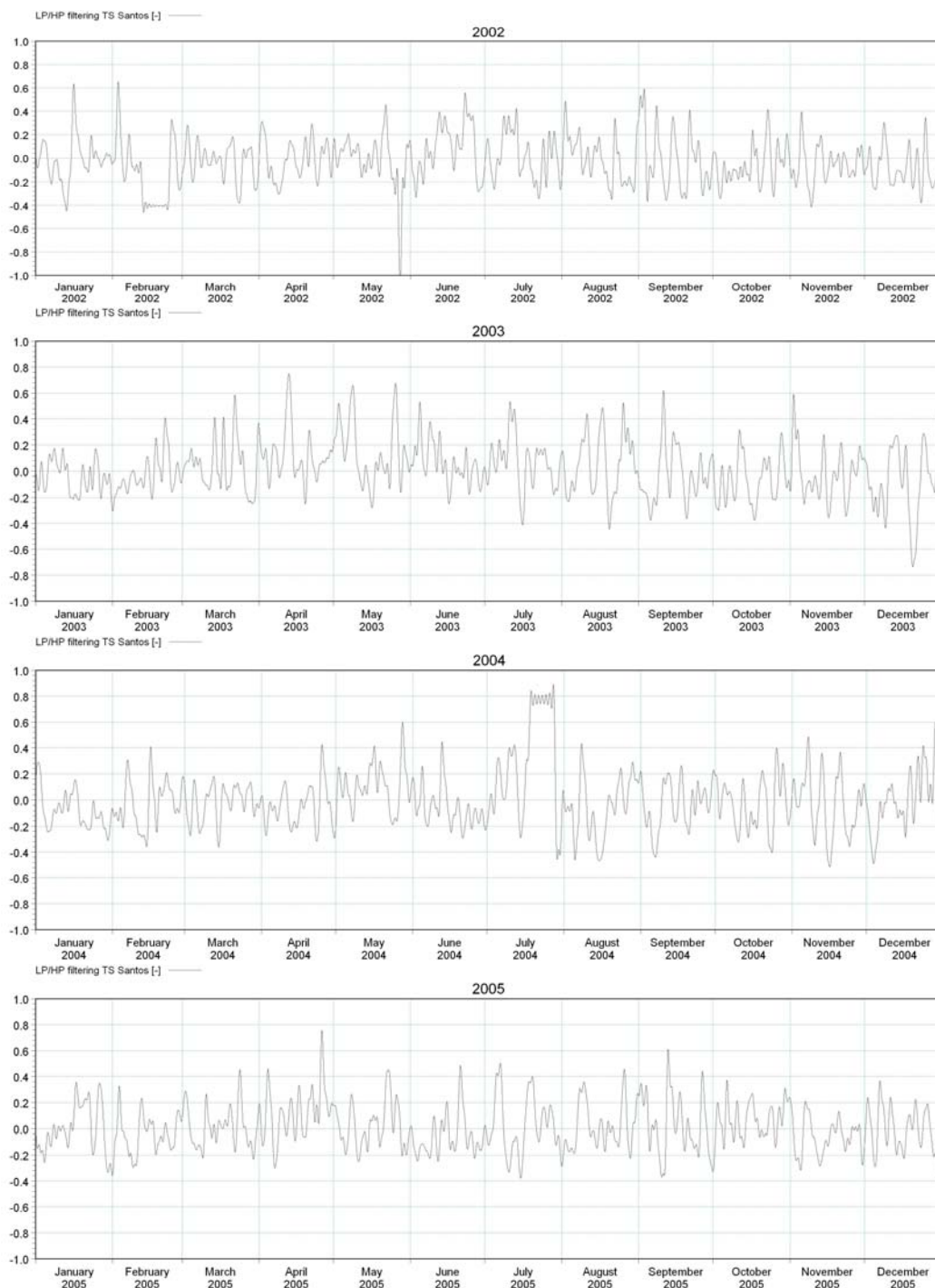


Figura 1: Series temporais filtradas para o período de 2000 a 2005.

A duração das ressacas foi estimada pelo cálculo do período em que o nível meteorológico esteve acima de um determinado nível de referência. Devido a incerteza da relevância do nível de referência representativo a análise foi realizada para diversos níveis de referência, que estão apresentados na Tabela 01.

Tabela 1: Duração anual das ressacas em função no nível de referência.



| Nível de Referência | Calmo | Ressaca |
|---------------------|-------|---------|
| 0.0 | 52.8% | 47.2% |
| 0.1 | 72.5% | 27.5% |
| 0.2 | 85.9% | 14.1%% |
| 0.3 | 93.1% | 6.9% |
| 0.4 | 97.0% | 3.0% |
| 0.5 | 98.5% | 1.5% |

Dos valores apresentados na Tabela 01 acredita-se que o nível de referência representativo para o cálculo das ressacas em Santos é 0.2m, o que significa dizer que em cerca quatro dias por mês o sistema se encontra sobre o efeito de ressacas.

2 Estimativa da descara fluvial.

Devido a indisponibilidade de dados de qualidade de descara fluvial por um longo período, foram utilizados os dados de pluviosidade da estação meteorológica do INMET, no Mirante de Santana em São Paulo como estimativa da importância da descara fluvial entre os anos de 2000e 2005. Os gráficos abaixo apresentam os dados utilizados.

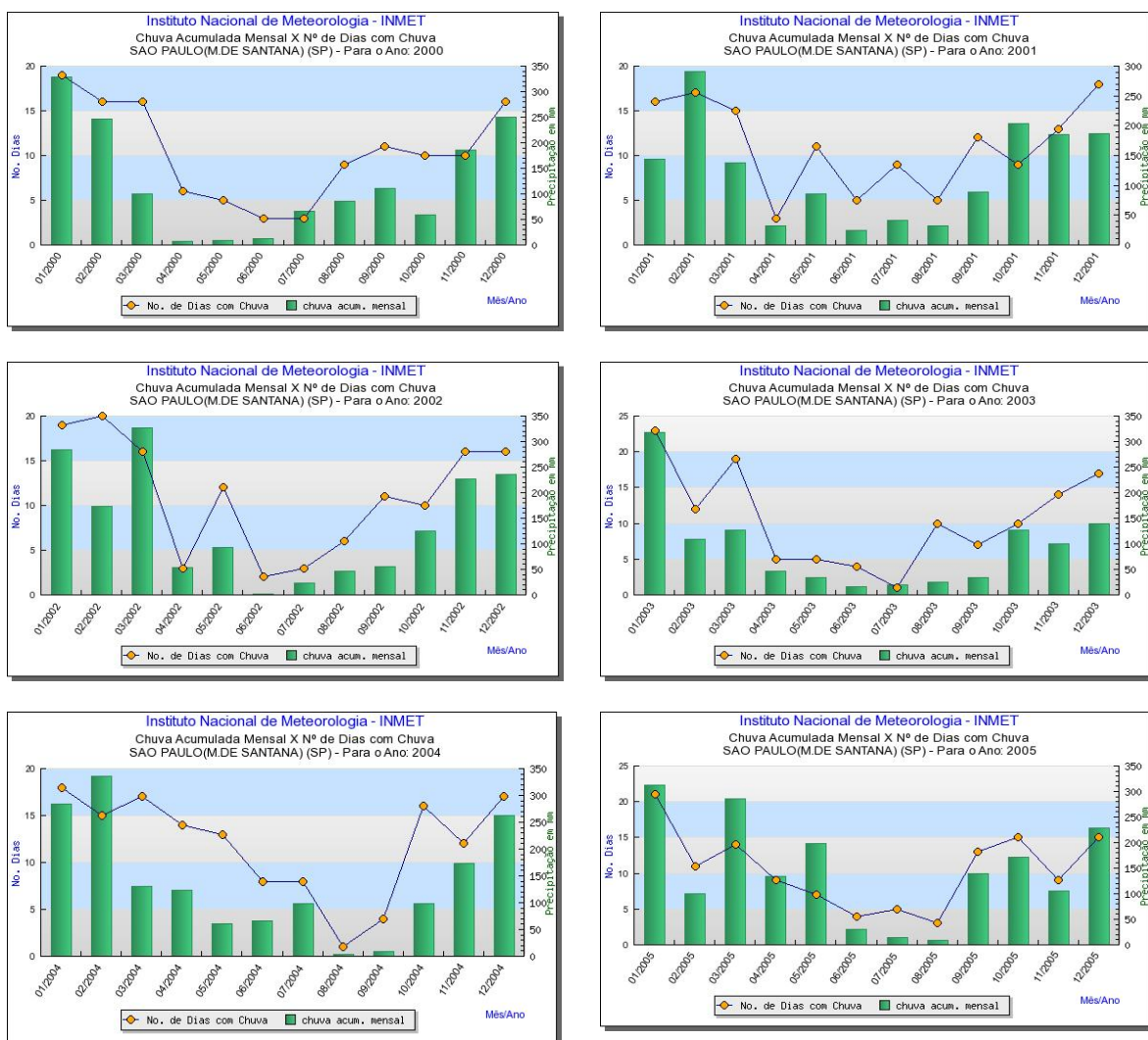


Figura 2: Gráficos de precipitação pluviométrica para o Mirante de Santana, São Paulo - SP.



3 Cálculo do coeficiente de escalonamento

Uma vez estimada a ocorrência mensal de ressacas e volumes pluviométricos o coeficiente de escala foi obtido pelo cálculo da probabilidade dos eventos ocorrerem concomitantemente.

A Tabela 02 apresenta os coeficientes obtidos utilizados no cálculo da sedimentação anual no Porto de Santos.

Tabela 02: Peso atribuído aos cenários e dias de ocorrência por ano utilizado no cálculo do balanço de sedimento anual no Porto de Santos-SP.

| | Sem ressaca / grande pluviosidade (Cenário 1) | Sem ressaca / pequena pluviosidade (Cenário 2) | Ressaca / grande pluviosidade (Cenário 5) | Ressaca / pequena pluviosidade (Cenário 6) |
|--------------------|---|--|---|--|
| Porcentagem do ano | 23% | 63% | 3% | 11% |
| Dias do ano | 85 | 228 | 11 | 41 |

Devido a incerteza do valor representativo do nível de referência utilizado para quantificar a ocorrência de ressacas foi realizado um teste de sensibilidade para os demais níveis apresentados na Tabela 01. Foi testado também o efeito do aumento na precipitação pluviométrica em 20%.

A Tabela 03 apresenta os fatores de escala calculados para variações no nível de referência e para variações de 20% na quantidade de chuva para o período.

Tabela 03: Fatores de escala calculados para diferentes níveis de referência e precipitação pluviométrica.

| Nível de Referência | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 5 | Cenário 6 |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.20 | 23% | 63% | 3% | 11% |
| 0.15 | 22% | 58% | 4% | 16% |
| 0.00 | 15% | 38% | 12% | 35% |
| 0.20/1.20*chuva | 28% | 58% | 3% | 11% |
| 0.00/1.20*chuva | 17% | 35% | 14% | 33% |

A análise de sensibilidade foi realizada calculando o balanço sedimentar para os diversos parâmetros de escala apresentados na Tabela 03. Os valores calculados apresentaram variação máxima de 23%, evidenciando a pouca sensibilidade do cálculo do balanço de sedimento anual para os parâmetros de escala apresentados acima. Para o balanço sedimentar anual foi então utilizado o parâmetro de escala apresentado na Tabela 02.



A P Ê N D I C E B

Áreas de sedimentação (versão ampliada)



Projeto Porto de Santos

Balço Anual de Sedimento Coesivo em Toneladas por Área.

