

6. PROGRAMA DE MONITORAMENTO E MODELAGEM DE PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS E OCEANOGRÁFICOS	1
6.1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
6.2. MATERIAIS E MÉTODOS	2
6.3. RESULTADOS.....	12
6.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
6.5. REFERÊNCIAS	62

6. Programa de Monitoramento e Modelagem de Parâmetros Hidrodinâmicos e Oceanográficos

6.1. Introdução e Objetivos

O presente programa tem como objetivos aferir e verificar as alterações na hidrodinâmica e na dinâmica de transporte de sedimentos no Estuário de Santos após as obras de dragagem de aprofundamento do canal de navegação e das bacias de evolução do Porto de Santos, em função das condições a serem inicialmente medidas e modeladas matematicamente.

Tais alterações serão avaliadas através da simulação de uma série de cenários hidrodinâmicos e meteorológicos. Estes cenários (constituídos por combinações de velocidade e direção dos ventos, variações do nível de água, descargas fluviais, precipitações, etc.) serão selecionados em função da base de dados disponível e através de medições em campo efetuadas após a realização da dragagem de aprofundamento.

O início deste estudo deu-se após a finalização das obras, visto que o modelo hidrodinâmico a ser empregado deve contar necessariamente com dados de entrada reais ao cenário do estuário após o aprofundamento do canal. Para sua implantação, o trabalho deve partir dos dados medidos em campo após a obra, como suas condições de contorno, batimetria, vazões dos rios e canais contribuintes, granulometria, entre outros, para que a modelagem reproduza o mais fidedignamente possível o ambiente após a dragagem de aprofundamento.

O programa abrange o Estuário de Santos, incluindo as áreas de manguezais, bem como a parte externa do canal de navegação. As atividades contemplam coletas para análises granulométricas, de dados oceanográficos e meteorológicos, além da modelagem propriamente dita.

O presente relatório complementa os resultados apresentados no relatório RT-06-250412, incluindo a batimetria atual do Estuário de Santos no modelo hidrodinâmico Delft-3D, representativa do mesmo ambiente após o aprofundamento do canal de navegação do Porto de Santos. Nesta implementação atualizada é considerada a finalização da dragagem do Trecho 4,

bem como os resultados das campanhas de medição de parâmetros oceanográficos realizadas em fevereiro de 2013 (correntes, hidrografia e concentrações de materiais em suspensão). Além dessa campanha de 2013, também são considerados dados de correntes obtidos em 2012.

A incorporação e interpretação desses dados visaram à validação do modelo proposto, uma vez que o processo inicial de calibração do modelo partiu de dados secundários e de um conjunto de medições de corrente em uma única seção do Canal do Porto de Santos, próximo ao terminal aeroportuário, realizadas em 2011. As medições complementares, realizadas em 2012 e 2013, foram efetuadas ao longo de seis e oito seções transversais, respectivamente, distribuídas ao longo do estuário de Santos.

6.2. Materiais e Métodos

6.2.1 Descrição Física do Estuário de Santos

O Estuário de Santos é, na realidade, um complexo estuarino formado por canais de acesso e de navegação, rios, riachos e por canais de drenagem urbana. A dinâmica estuarina é relativamente complexa, pois depende da componente baroclínica, relacionada à estrutura vertical e horizontal da distribuição de densidade (temperatura e salinidade), e barotrópica, definida pela maré astronômica e pelos sistemas meteorológicos frontais.

Do ponto de vista hidrodinâmico, o Canal de Navegação do Porto de Santos é uma das principais componentes desse estuário e, através de sua ligação com a Baía de Santos (BS), drena uma parcela significativa da contribuição hidrológica e dos sedimentos em suspensão, clásticos e orgânicos.

Além das variações da carga hídrica decorrentes do regime sazonal e de outras escalas temporais (p. ex.: interdecadal: El-Niño Oscilação Sul), o Estuário de Santos experimenta alterações dinâmicas significativas ocasionadas por interferência operacional da Usina Hidrelétrica Henry Borden II e do sistema de drenagem emergencial da Região Metropolitana de São Paulo. Essas interferências aumentam muito a carga hídrica no complexo estuarino e seus impactos ainda não são completamente conhecidos ou, tampouco, mensurados.

A maré, outra componente importante na dinâmica estuarina, é continuamente registrada na estação de Torre Grande (23° 56.95' S, 46° 18.50' O), apresentando razão de forma $F = 0,30$ e definindo-a como maré semidiurna de desigualdades diurnas (Harari *et al.*, 2008). As amplitudes de maré variam de 0,14 a 0,60 m, de acordo com os períodos de quadratura e de sizígia. As principais componentes são as semidiurnas (M2 e S2), com amplitudes e fases de 37,32 cm e 173,36°Gw respectivamente, e as diurnas (O1 e K1), com amplitudes e fases de 11,69 cm e 124,22° Gw (Harari e Camargo, 1995).

De acordo com Fundespa (2002), amostragens representativas dos parâmetros físicos no Estuário de Santos indicaram que a salinidade é mais importante do que a temperatura na determinação da densidade, sendo esta característica típica dos estuários de regiões tropicais. A temperatura varia entre 19 e 24°C, dependendo da estação do ano e da localização no estuário enquanto a salinidade varia entre 15 e 35, também de acordo com essas dependências. O regime de chuvas e a localização relativa aos principais afluentes determinam significativamente na distribuição de salinidade. O regime de chuvas e a localização relativa aos principais afluentes determinaram significativamente a distribuição de salinidade. A estratificação vertical de salinidade obtida definiu o estuário de Santos na região mais próximo de sua cabeceira como sendo parcialmente misturado e moderadamente estratificado. Isto indica que parte da energia da maré é dispensada para a mistura vertical da coluna de água e, portanto, as condições de estratificação também dependem do ciclo das marés de sizígia e de quadratura.

Durante os períodos de quadratura e ao longo do principal canal estuarino (Canal do Porto de Santos), as correntes de maré oscilam variando tipicamente entre $-0,27$ e $0,32 \text{ m.s}^{-1}$ (>0 , corrente em direção ao continente, sentido estuário acima) na superfície; $-0,22$ e $0,26 \text{ m.s}^{-1}$ na profundidade de 5 m e entre $-0,15$ e $0,25 \text{ m.s}^{-1}$ próximo ao fundo, a 10 m (Harari *et al.*, 2008). A maior assimetria das correntes, notavelmente na maior profundidade, indica a importância do efeito baroclínico ao forçar a penetração da cunha salina estuário acima. Tal efeito pode favorecer o transporte de substâncias provenientes da região costeira no sentido do estuário acima. Nas condições das marés de sizígia a amplitude da maré é

maior e a dinâmica e os processos de mistura no estuário também são mais energéticos. As correntes são mais intensas, atingindo $-0,45$ e $0,35 \text{ m.s}^{-1}$ na superfície; $-0,35$ e $0,30 \text{ m.s}^{-1}$ na profundidade de 5 m, e $-0,26$ e $0,25 \text{ m.s}^{-1}$ próximo ao fundo, na profundidade de 10 m (Harari, *op.cit.*).

Seguindo para norte, em direção ao polo siderúrgico de Cubatão, o Canal de Piaçaguera é o acesso relativamente mais estreito do estuário para a navegação de embarcações de grande porte. A salinidade é relativamente menor nessa região, principalmente devido às descargas dos principais afluentes desse setor estuarino: Rio Cubatão e Rio Quilombos. O Rio Itapanhaú é outro afluente importante, afetando principalmente o setor leste, definido pelo Canal de Bertioga. A circulação gravitacional é importante no Canal de Piaçaguera, onde as correntes variam tipicamente entre $-0,60$ e $0,50 \text{ m.s}^{-1}$ (Fundespa, 2002).

Como mencionado, o Canal de Bertioga é outro componente do Sistema Estuarino de Santos, uma vez que possui uma ligação com o Canal do Porto de Santos e forma uma saída para o oceano no sentido nordeste dessa ligação. Nesta saída encontra a cabeceira do Rio Itapanhaú, formando pouco mais adiante a Barra de Bertioga. Desprende-se dessa formação a Ilha de Santo Amaro, a qual abriga o município de Guarujá. A entrada do canal (ligação com o Canal do Porto) está localizada no ponto de coordenada: lat. $23^{\circ} 55' \text{ S}$; lon. $046^{\circ} 18' \text{ W}$ e a saída, na Barra de Bertioga, em: lat. $23^{\circ} 51' \text{ S}$; lon. $046^{\circ} 08' \text{ W}$. O canal apresenta variações em sua largura de 200 a 700 m, com profundidades entre 3 e 6 m e depressões que atingem até 10 m, principalmente onde os meandros são mais fechados. A maior largura é na parte central do canal (Largo do Candinho), na confluência com o Canal do Porto de Santos (a oeste) e a Barra de Bertioga (a leste). As profundidades neste local estão entre 10 e 12 m em pontos próximos dessa barra. De acordo com Miranda, Castro e Kjerfve (1998), o fato do canal ser relativamente mais estreito entre o Largo do Candinho e o Canal do Porto de Santos, inibe as trocas de sal neste segmento.

O Rio Itapanhaú é o principal tributário desse sistema, com descarga média de água doce em torno de $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (DAEE, 1997; Eichler *et al.*, 2007). De acordo com essas referências, o Canal de Bertioga abrange uma grande amplitude de ambientes estuarinos, desde zonas rasas definidas por grandes depósitos de

lama e manguezais ricos em depósitos orgânicos, até regiões predominantemente de fundo arenoso, com salinidades típicas dos mares de regiões costeiras. Em estudo sobre foraminíferos no Canal de Bertioga, Eichler e colaboradores (2007) mediram a salinidade em 88 estações superficiais, constatando que as variações dessa propriedade são grandes na região leste e no Rio Itapanhaú, tipicamente entre 18 e 35. Em distintas regiões a oeste e central do canal, a salinidade variou entre 18 e 30 e 5 e 30, respectivamente.

Segundo Miranda, Castro e Kjerfve (1998), esse canal estuarino é parcialmente misturado do tipo 2. Durante a modulação quinzenal e seguindo a transição da maré de quadratura para a de sizígia, o estuário passa de altamente estratificado (Tipo 2B) para moderadamente estratificado (Tipo 2A). Com relação ao transporte de sal estuário acima, os processos de advecção e difusão também transitam. São parcialmente equilibrados durante as marés de sizígia, porém, durante as de quadratura 90% do transporte é devido à difusão de sal estuário acima.

6.2.2. Conceitos da dinâmica estuarina e conceitos hidrológicos

Miranda, Castro e Kjerfve, (2004) definem **Prisma de Maré** como sendo o volume de água do mar que entra no estuário durante a maré enchente (P), estando relacionado diretamente com a altura da maré, através da expressão $P = H_o \times A_s$, onde H_o e A_s são, respectivamente, a altura da maré no estuário e sua área superficial. Para estimar a importância relativa entre a maré e a descarga fluvial, basta avaliar a relação entre o volume de água doce descarregado no estuário durante o período de maré, $R = Q_f \times T$, e o prisma de maré. O canal estuarino do Porto de Santos apresenta razão R/P muito pequena ($R/P \ll 1$), indicando que o estuário é dominado pela maré.

Frente Estuarina é a região na zona de mistura do estuário onde a estratificação vertical de densidade é melhor definida. Neste sentido, no presente trabalho utiliza-se o conceito de região de máximo gradiente de salinidade para definir a posição da frente. Associa-se esta posição com o conceito de penetração da **Cunha Salina**, salientando que o valor de salinidade do máximo gradiente

varia de acordo com o regime de marés, com o regime fluvial e com as alteração do volume causada pela dragagem. Portanto, os deslocamentos do máximo gradiente de salinidade é mais importante do que simplesmente considerar as excursões de um determinado perfil isohalino.

Vazão Média de Longo Termo ou Média Histórica de Vazão representam o valor médio de vazão obtido do registro da série histórica de vazões medidas em uma estação linimétrica. Sua obtenção depende do intervalo amostrado, podendo ser representada a partir das médias diárias, das médias mensais ou para outros períodos determinados. Desse modo, representa o valor associado à situação mais provável ou mais influente da carga fluvial do estuário. A vazão mínima, representada usualmente pelo conceito de $Q_{7,10}$, é muito importante em estudos de avaliação da disponibilidade hídrica ou estudos de dispersão de contaminantes, não tendo utilidade prática neste estudo de avaliação. Entrementes, o conceito de **Vazão de Permanência**, adotado por Cruz e Tucci (2008), é comumente utilizado em estudos de análise da disponibilidade hídrica e traz significado expressivo para este estudo. Conceitualmente, a vazão de permanência ou duração da vazão, é obtida através do lançamento gráfico dos dados de uma série histórica de vazão (Figura 6.2.2-1). Desse modo, a vazão de permanência é relacionada com a percentagem do tempo em que ela é superada ou igualada, sobre toda a série histórica. No presente estudo foi escolhido o percentil 10% para representar as situações quando a carga hídrica no estuário é relativamente intensa e frequente. Esta é a situação que ocorre durante os eventos mais chuvosos na região.

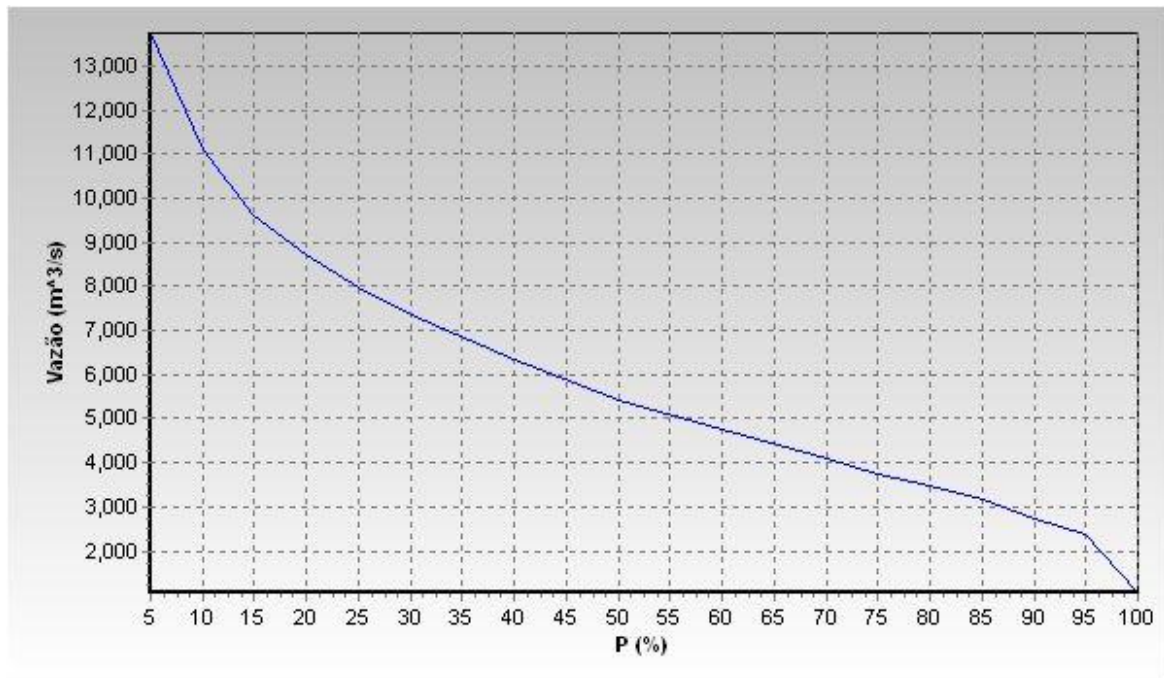


Figura 6.2.2-1. Curva de permanência das médias diárias para as bacias da Região da Baixada Santista (Fonte: Sistema de Informações para o Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo).

6.2.3 Modelo Hidrodinâmico Delft3D / Deltares

Para o licenciamento da obra de dragagem de aprofundamento do Canal de Navegação do Porto de Santos foi desenvolvido um modelo hidrodinâmico para avaliação do padrão de circulação no estuário e o comportamento das correntes e penetração da cunha salina. Este modelo foi utilizado como base para a nova representação das condições hidrodinâmicas locais, considerando sua atualização a partir de novos dados de campo para entrada no modelo.

O modelo matemático Delft3d (Deltares) foi utilizado para resolver os aspectos da circulação e do transporte de sal no Estuário de Santos. Trata-se de um modelo que resolve por completo o sistema de equações diferenciais que regem o escoamento do fluido geofísico. Considera a influência de vários processos, forças e grandezas envolvidas no movimento, tal como gradientes de densidade, marés, advecção e difusão de sal, temperatura e momentum, além de dispor de sofisticados submodelos de fechamento para resolver a turbulência.

O modelo utiliza um esquema de discretização baseado em diferenças finitas para solução das Equações de Navier-Stokes para o fluido geofísico. A

discretização vertical é feita através da transformação da coordenada cartesiana (z) para a coordenada σ , melhor representante das feições batimétricas.

Outra vantagem do modelo Delft3d é sua capacidade de representar domínios complexos, como o Estuário de Santos, a partir de submodelos individuais. Esse processo é chamado de “Decomposição de Domínio” e combina as vantagens computacionais do método de diferenças finitas com a flexibilidade de representação geométrica do método de elementos finitos. Neste estudo utilizou-se três domínios para representação de todo o estuário tal como visto na Figura 6.2.3-1, com resolução adequada para solução da dinâmica no canal principal. O painel à direita na Figura 6.2.3-1 mostra uma área em detalhe para o Canal do Porto de Santos, próximo à Ilha Barnabé.

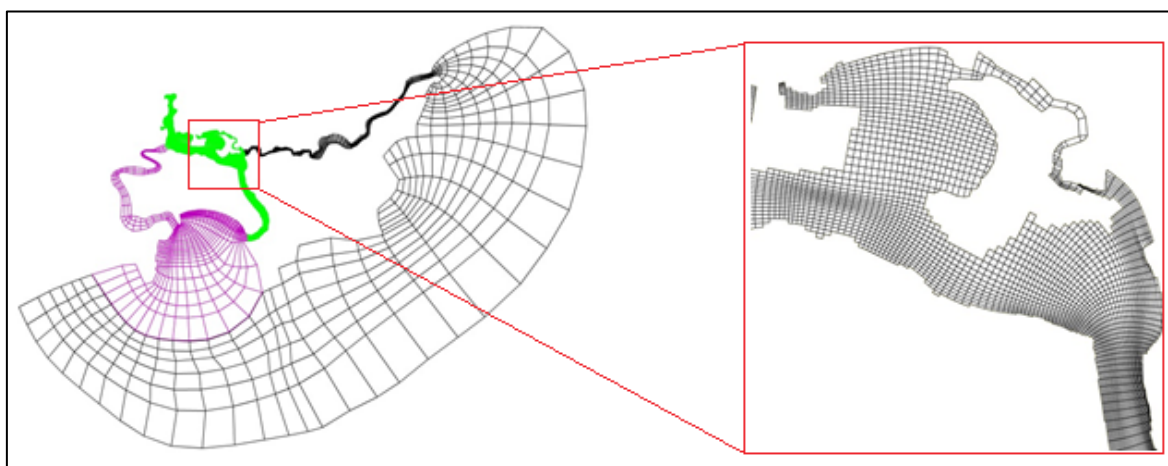


Figura 6.2.3-1. Domínios computacionais utilizados para a representação da região do estuário de Santos. À esquerda: grade principal em verde (Canal do Porto); grade auxiliar do Canal de Bertioga, em preto; e grade auxiliar para a Baía de Santos, em magenta. À direita: detalhamento da grade principal nas proximidades da Ilha Barnabé.

A Tabela 6.2.3-1 mostra as características das grades computacionais desenvolvidas para cada domínio, antes da agregação (Composição de Domínios) para a representação global da região modelada.

Tabela 6.2.3-1. Dimensões e resoluções das grades computacionais empregadas.

Grade	Nº de elementos	Elementos molhados	Resolução média (m)
Principal	46 X 201	6269	50
Bertioga	157 X 14	1008	1000
Baía de Santos	78 X 26	743	150

Os experimentos numéricos foram desenvolvidos por 15 dias (360 horas), tempo suficiente para cobrir os ciclos de maré de sizígia e quadratura, e foram realizados considerando combinações de diferentes cenários de fatores hidrológicos (regimes de vazão) e de marés (períodos de sizígia e quadratura), além da situação batimétrica (antes e após dragagem de aprofundamento). A combinação de situações para cada caso estudado está sintetizada na Tabela 6.2.3-2.

Tabela 6.2.3-2. Síntese das combinações de fatores hidrológicos (regimes de vazão) e de marés (períodos de sizígia e quadratura), além da situação batimétrica (antes e após dragagem de aprofundamento) para cada caso estudado.

	Situação Pretérita	Pós-dragagem	Vazão Média L.T.	Vaz. perm. 10%	Quadratura	Sizígia
Caso 1	✓		✓		✓	
Caso 2	✓			✓	✓	
Caso 3	✓		✓			✓
Caso 4	✓			✓		✓
Caso 5		✓	✓		✓	
Caso 6		✓		✓	✓	
Caso 7		✓	✓			✓
Caso 8		✓		✓		✓

6.2.4. Dados de entrada do modelo

Batimetria

Os dados de batimetria para o Estuário de Santos foram fornecidos pela Codesp e contemplaram as fases pretéritas e após conclusão da dragagem de aprofundamento do Canal de Navegação do Porto de Santos, conforme visto na Figura 6.2.4-1.

O levantamento batimétrico completo por trecho após o aprofundamento de cada trecho do canal de navegação (1, 2, 3 e 4) até a cota projetada (-15 m), foi realizado pela SEP, servindo como dado de entrada para a aferição e calibração das simulações numéricas.

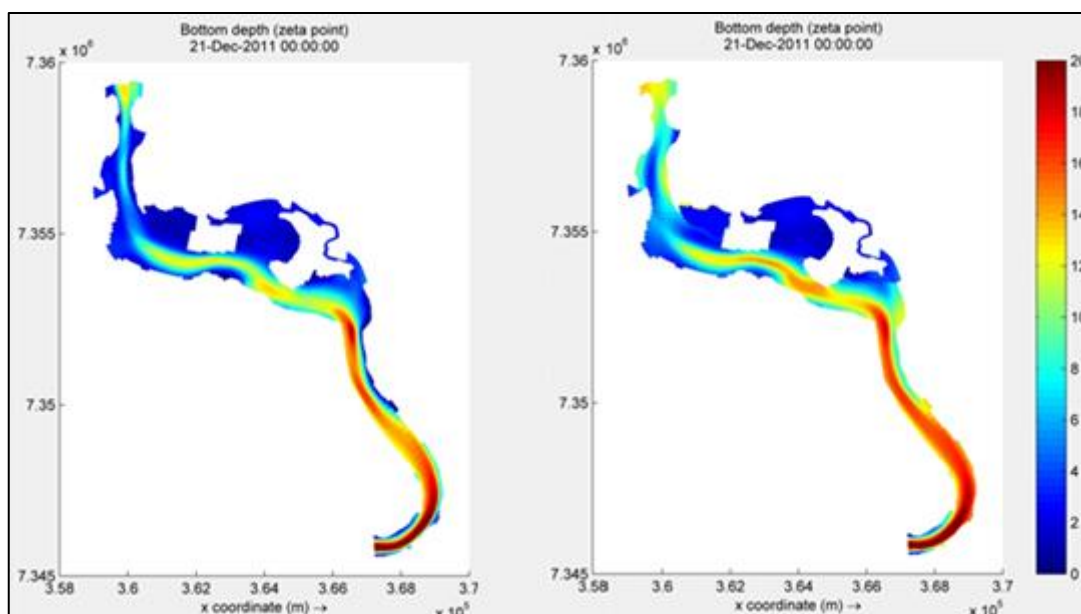


Figura 6.2.4-1. Batimetria do Estuário de Santos antes (à esquerda) e após (à direita) às obras de dragagem de aprofundamento do Canal de Navegação do Porto de Santos utilizadas nos modelos referente aos casos 1 – 4 e 5 – 8, respectivamente. Os valores são representados em metros.

Correntes e Marés

As correntes no canal estuarino foram obtidas na campanha realizada previamente em 2011, utilizando-se perfilador de correntes acústico (*Acoustic Doppler Current Profile – ADCP*). As atividades desta campanha estão detalhadas no Item 6.3.2. Além disso, dados secundários disponíveis na literatura serviram para avaliar a implementação do modelo, uma vez que a dinâmica desse estuário é dominada por marés e esta apresenta comportamento regular e harmônico.

Os dados de marés utilizados nesse estudo (componentes da análise harmônica) estão disponíveis na literatura e reunidos no Catálogo de Marés, disponíveis no site da Fundação de Estudos do mar FEMAR (www.fundacaofemar.org.br/).

Dados de Vazão

Os dados de vazão foram obtidos a partir de um Diagrama Unifilar da rede Hidrológica para o Estuário de Santos apresentado no Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) do projeto de aprofundamento do canal de navegação do Porto de Santos (FRF, 2008). As estimativas das vazões de permanência foram determinadas a partir da Curva de Permanência para o Estuário de Santos, disponível em <http://www.dae.sp.gov.br>.

Composição Granulométrica

Durante o monitoramento ambiental das atividades de dragagem de aprofundamento do Canal de Navegação do Porto de Santos, foram realizadas coletas e análises de material superficial de fundo da área do canal de navegação externo e de toda a área estuarina, fornecendo dados de caracterização granulométrica do sedimento (Fundespa, 2011). Estes dados também foram utilizados como dados de entrada do modelo.

6.2.5. Validação do Modelo

Para validação da qualidade da modelagem foi utilizado método proposto por Willmott (1981) (critério SKILL), que se baseia na avaliação estatística entre os dados modelados e séries temporais reais, de acordo com a seguinte equação:

$$SKILL = 1 - \frac{\sum |X_{model} - X_{obsv}|^2}{\sum (|X_{model} - \langle X_{obsv} \rangle| + |X_{obsv} - \langle X_{obsv} \rangle|)^2}$$

Onde X representa a série temporal da variável considerada. Este parâmetro varia entre 0 e 1, indicando melhor aderência dos dados modelados, na medida em que se aproxima de 1. No caso deste estudo, as medições de temperatura, salinidade e velocidade da corrente não foram feitas na forma de série temporal e,

portanto, as comparações foram meramente instantâneas. Para o nível do mar, aplicou-se o parâmetro SKILL considerando as séries temporais da previsão (Programa PACMARÉ, Almirante Franco) de nível do mar como dados observados.

6.2.6. Transporte de Sedimentos no Estuário de Santos

Para o desenvolvimento de um estudo de processos de sedimentologia marinha é necessário um conjunto observacional extenso e minucioso. Além de dados oceanográficos e modelos, estudos hidrológicos e geomorfodinâmicos são essenciais para avaliação das condições de transporte, deposição e erosão dos sedimentos no ambiente aquático. O modelo desenvolvido neste estudo congregou um módulo de transporte e processos relacionados à sedimentologia marinha. Na campanha de 27 de fevereiro de 2013 foram efetuadas medições de concentração de sedimentos que permitiram uma estimativa de alguns processos relacionados à sedimentologia do Estuário de Santos.

6.3. Resultados

6.3.1. Atividades desenvolvidas

Foi realizada no verão de 2013, no âmbito deste programa, uma campanha de medições de correntes, marés, salinidade, temperatura e sólidos em suspensão nas seções de 4 a 11 apresentadas na Tabela 6.3-1 e Figura 6.3-1. Essas medições tiveram intuito de validar, com valores de campo, a modelagem matemática para as diversas condições hidrodinâmicas, hidrológicas e meteorológicas.

Tabela 6.3-1. Coordenadas das seções de coletas para as medições de marés, correntes, salinidade, temperatura e sólidos em suspensão.

Seção	Margem Esquerda		Margem Direita	
S4	23° 59.670 S	46° 18.374 W	23° 59.496 S	46° 18.292 W
S5	23° 57.938 S	46° 17.483 W	23° 58.154 S	46° 17.833 W
S6	23° 57.153 S	46° 18.306 W	23° 57.194 S	46° 18.558 W
S7	23° 55.431 S	46° 18.444 W	23° 55.268 S	46° 18.550 W
S8	23° 55.380 S	46° 19.940 W	23° 55.601 S	46° 20.132 W
S9	23° 54.799 S	46° 22.815 W	23° 55.074 S	46° 22.733 W
S10	23° 54.049 S	46° 22.408 W	23° 54.071 S	46° 22.677 W
S11	23° 53.353 S	46° 22.460 W	23° 53.264 S	46° 22.637 W

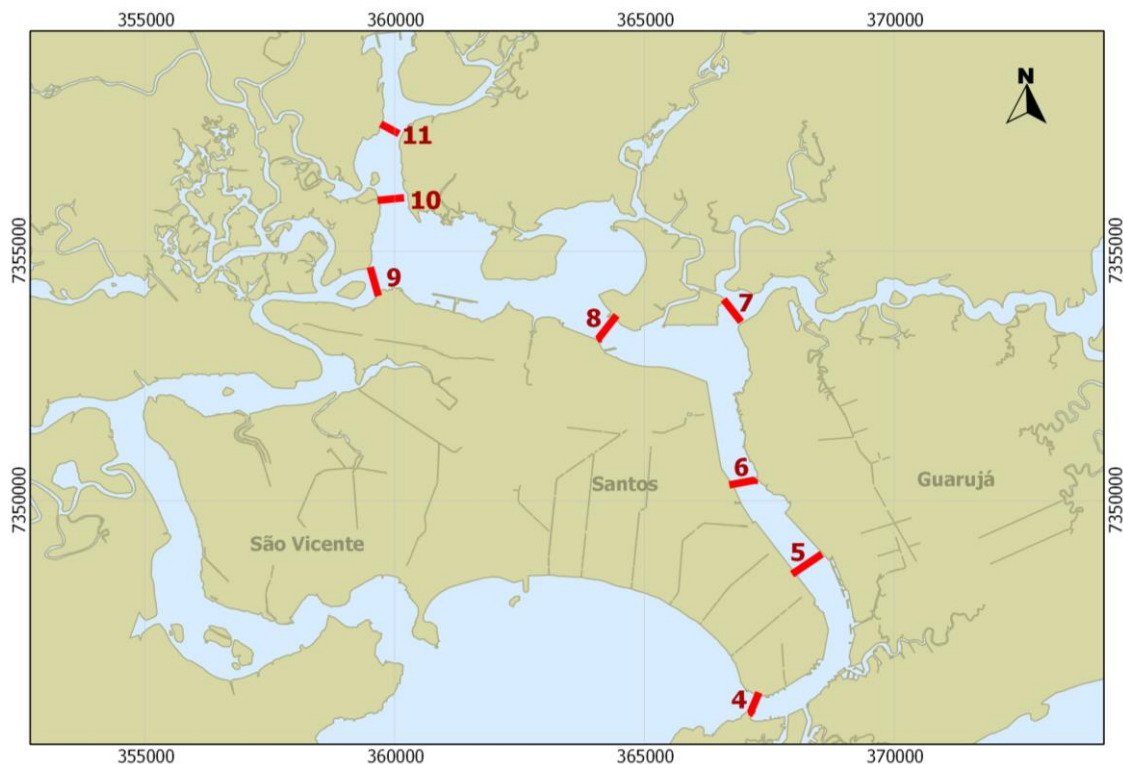


Figura 6.3-1. Localização das seções de coletas para as medições de marés, correntes, salinidade, temperatura e sólidos em suspensão.

As medições de salinidade, temperatura e sólidos em suspensão foram realizadas em amostras de água coletadas com garrafa de Niskin no ponto central das seções, a 2 metros da superfície e a 2 metros do fundo ou a meia profundidade quando a profundidade local for inferior a 6 metros. As medições hidrográficas de temperatura e salinidade foram obtidas por perfilamento vertical

de um CTD Sontek-YSI em 3 pontos ao longo das mesmas seções onde as correntes foram medidas.

Anteriormente a essa campanha de 2013, também foi realizada uma campanha complementar, em 2012, utilizando um perfilador de correntes acústico, ADCP Sontek 1MHz, para medições de vazão apenas nas principais seções do estuário (Seção 4 a Seção 9, conforme Figura 6.3-1).

6.3.2. Calibração e Validação do Modelo Hidrodinâmico

Parte das informações utilizadas para implementação e calibração do modelo foram obtidas da literatura disponível, tais como as constantes harmônicas de maré, descrição das massas de água e dados cartográficos e batimétricos. Já os dados de corrente, temperatura e salinidade foram obtidos através de campanhas de coleta.

As medições no canal do Porto de Santos realizadas em 2011, destinadas à obtenção de estimativas da corrente, consideraram a variação temporal associada às marés. A Figura 6.3.2-1 ilustra a localização das seções de perfilamento de correntes, nas proximidades do Terminal Aeroportuário, no Canal do Porto de Santos e em saídas do Canal de Bertioga e do Rio Diana.



Figura 6.3.2-1. Localização das seções transversais de perfilações de corrente realizadas em 2011, no Canal do Porto de Santos (a), na saída do Canal de Bertioga (b) e na saída do Rio Diana (c). O sinal (+) indica o sentido da corrente, estuário acima.

O perfilador de correntes acústico (ADCP) utilizado foi montado numa estrutura flutuante rebocável, do tipo trimaran, tal como visto na Figura 6.3.2-2.



Figura 6.3.2-2. ADCP Sontek 1000 kHz, montado num trimaran, com sistema de transmissão de dados via rádio (Wi-Fi).

Nesta campanha realizada no dia 29 de julho de 2011 foram efetuadas 18 medições na seção no canal do Porto de Santos, porém em instantes de tempo distribuídos desde às 08h e 26m até às 18h e 10m (Tabela 6.3.2-1). O ADCP perfilou toda a coluna de água com taxa de registro de 5 segundos. Depois de completado o perfilamento ao longo das seções, o software “Sontek - River Surveyor” integrou os resultados obtendo-se os valores instantâneos, médios e suas interpretações (profundidade local, área da seção, vazão pontual e vazão total integrada).

Tabela 6.3.2-1. Correntometria no canal do Porto de Santos, realizada com ADCP Sontek 1000 kHz (29 de julho de 2011). Valores de velocidade média (m/s) positivos indicam sentido estuário baixo.

Hora	Área (m ²)	Velocidade média m/s) + estuário abaixo	Vazão (m ³ /s)	Local	Longitude	Latitude
08:26	2.367,9	-0,04	-104,98	Porto de Santos	046°18'37"O	23°56'02"S
09:04	6.239,4	-0,16	-1.006,50	Porto de Santos	046°18'37"O	23°56'02"S
09:20	4.925,1	-0,01	-41,03	Porto de Santos	046°18'37"O	23°56'02"S
10:19	6.206,7	-0,33	-2.063,70	Porto de Santos	046°18'37"O	23°56'02"S
10:31	5.364,6	-0,03	173,10	Porto de Santos	046°18'37"O	23°56'02"S
10:44	3.457,4	-0,29	-989,82	Porto de Santos	046°18'37"O	23°56'02"S
11:17	181,0	-0,55	-99,669	Porto de Santos	046°18'37"O	23°56'02"S
12:11	4.943,9	-0,24	-1.204,30	Porto de Santos	046°18'37"O	23°56'02"S
12:25	1.293,3	-0,3	-388,25	Porto de Santos	046°18'37"O	23°56'02"S
13:33	6.716,2	-0,18	-1.188,80	Porto de Santos	046°18'37"O	23°56'02"S
13:47	7.521,8	-0,38	-2.873,50	Porto de Santos	046°18'37"O	23°56'02"S
15:13	3.015,0	-0,07	213,24	Porto de Santos	046°18'37"O	23°56'02"S
15:20	640,0	0,25	157,78	Porto de Santos	046°18'37"O	23°56'02"S
16:53	3.749,5	0,56	2.087,80	Porto de Santos	046°18'37"O	23°56'02"S
17:04	916,7	0,27	245,13	Porto de Santos	046°18'37"O	23°56'02"S
17:14	402,3	0,7	281,16	Porto de Santos	046°18'37"O	23°56'02"S
17:57	8.153,4	0,28	2.249,80	Porto de Santos	046°18'37"O	23°56'02"S
18:10	7.470,5	0,47	3.488,70	Porto de Santos	046°18'37"O	23°56'02"S

Já as medições das seções na saída do Canal de Bertioga para o Canal do Porto de Santos e na saída do Rio Diana para o Canal do Porto foram realizadas de forma complementar e os resultados estão apresentados na Tabela 6.3.4-2.

Tabela 6.3.2-2. Correntometria realizada com ADCP Sontek 1000 kHz nas saídas do Canal de Bertioga e do Rio Diana (29 de julho de 2011). Valores de velocidade média (m/s) positivos indicam sentido estuário baixo.

Hora	Área (m ²)	Velocidade média m/s) + estuário abaixo	Vazão (m ³ /s)	Local	Longitude	Latitude
14:16	838,9	-0,35	-295,19	Canal de Bertioga	046°18'07"O	23°55'04"S
14:18	957	-0,29	-280,7	Canal de Bertioga	046°18'07"O	23°55'04"S
14:21	782,5	-0,35	-272,77	Canal de Bertioga	046°18'07"O	23°55'04"S
14:23	922,9	-0,33	-306,45	Canal de Bertioga	046°18'07"O	23°55'04"S
14:45	700,9	-0,19	-133,91	Rio Diana	046°18'41"O	23°55'02"S
14:48	652,7	-0,15	-98,013	Rio Diana	046°18'41"O	23°55'02"S
14:50	673,8	-0,15	-103,79	Rio Diana	046°18'41"O	23°55'02"S

Processamento de Dados

Os dados de velocidade obtidos em 2011 foram ajustados a partir do Método dos Mínimos Quadrados, onde se utiliza uma função do tipo $f(t) = a_0 \cos(a_1 \cdot t + a_2)$ para representação das correntes de maré. Estas, devido a sua natureza harmônica, são muito bem representadas por funções trigonométricas do tipo seno e cosseno.

Os coeficientes de melhor ajuste são: $a_0 = 0,4048$; $a_1 = 13,03$ e $a_2 = 1,481$. Sabendo que $a_1 = 2\pi/T$, estima-se o período $T = 0,48 d$ ou $11,57 h$, próximo ao período da componente de maré mais significativa da região ($TM2 = 12,42 h$) O coeficiente de ajuste do método foi $R^2 = 0,813$ para intervalo de confiança de 95%.

Os resultados deste ajuste são vistos na Figura 6.3.2.-3, a partir do conjunto de pontos observados e da função de ajuste representada. Um gráfico do nível do mar também é mostrado nessa figura, para propósito de avaliação da conhecida defasagem de $\pi/2$ radianos esperada entre os sinais do nível do mar e da corrente. Este fato é observado no gráfico, quando verificamos que o estôfo de baixamar coincide com a transição da corrente de maré em torno do valor zero (ponto de inflexão que define a transição da vazante para a enchente, em $t \sim 0,35 d$). O estôfo da preamar e a correspondente inflexão da enchente para vazante ocorrem em $t \sim 0,60 d$ aproximadamente 6 horas depois do evento anterior.

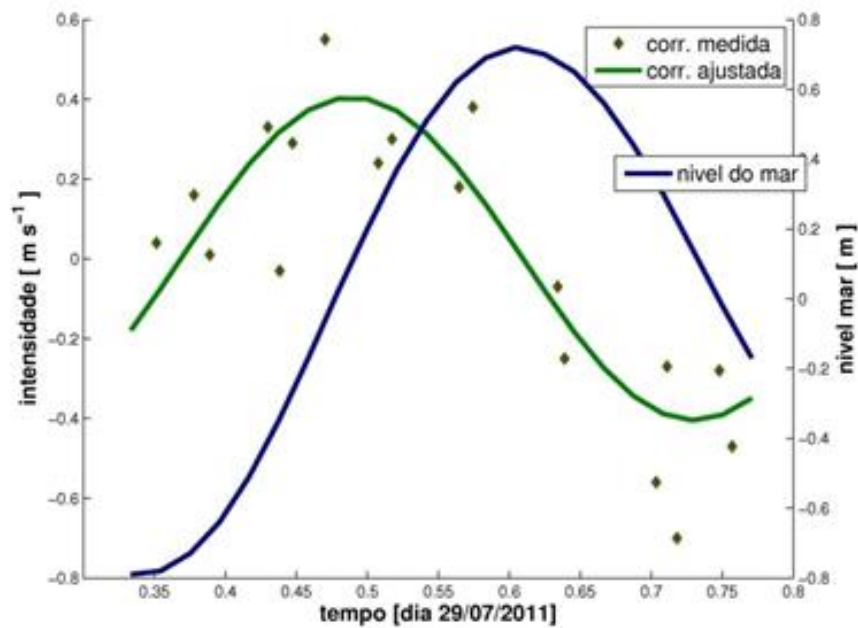


Figura 6.3.2-3. Corrente média na seção do canal do Porto de Santos (♦ medida e — ajustada) e nível do mar (—) obtido por previsão da maré para o Porto de Santos (<http://tbone.biol.sc.edu/tide/>). A referência de tempo é 00h/29/07/2011

Os dados ajustados foram utilizados para calibração e validação da modelagem numérica e estão sintetizados na Tabela 6.3.2-3.

Tabela 6.3.2-3. Dados de nível do mar e de correntes de maré ajustados. Os valores positivos indicam sentido da corrente estuário acima.

Hora(29/07/2011)	Nível (m)	Corrente (ms ⁻¹)	Long.	Latit.
08:00	-0.79	-0.18	046°18' 37"O	23°56'02"S
08:30	-0.78	-0.08	046°18' 37"O	23°56'02"S
09:00	-0.73	0.03	046°18' 37"O	23°56'02"S
09:30	-0.64	0.14	046°18' 37"O	23°56'02"S
10:00	-0.51	0.24	046°18' 37"O	23°56'02"S
10:30	-0.35	0.32	046°18' 37"O	23°56'02"S
11:00	-0.17	0.37	046°18' 37"O	23°56'02"S
11:30	0.02	0.4	046°18' 37"O	23°56'02"S
12:00	0.2	0.4	046°18' 37"O	23°56'02"S
12:30	0.37	0.37	046°18' 37"O	23°56'02"S
13:00	0.51	0.31	046°18' 37"O	23°56'02"S
13:30	0.62	0.23	046°18' 37"O	23°56'02"S
14:00	0.69	0.14	046°18' 37"O	23°56'02"S
14:30	0.72	0.03	046°18' 37"O	23°56'02"S
15:00	0.7	-0.08	046°18' 37"O	23°56'02"S
15:30	0.65	-0.18	046°18' 37"O	23°56'02"S
16:00	0.56	-0.27	046°18' 37"O	23°56'02"S
16:30	0.44	-0.34	046°18' 37"O	23°56'02"S
17:00	0.3	-0.39	046°18' 37"O	23°56'02"S
17:30	0.14	-0.4	046°18' 37"O	23°56'02"S
18:00	-0.02	-0.39	046°18' 37"O	23°56'02"S
18:30	-0.17	-0.35	046°18' 37"O	23°56'02"S

A calibração hidrodinâmica do modelo foi realizada ajustando-se os parâmetros computacionais, tais como atrito, coeficientes de difusão turbulentos para *momentum*, calor e sal. Os resultados modelados para o nível do mar tiveram ótimo ajuste (erro < 5%), enquanto os valores de corrente foram satisfatoriamente reproduzidos (erro ~ 10%) quando comparados com dados obtidos neste estudo.

Validação do Modelo Hidrodinâmico

A consagração de uso de um modelo matemático hidrodinâmico, com a finalidade de previsões ou elaboração de cenários representativos de condições distintas, deve necessariamente ser atestada pela validação do referido modelo,

isto é, após implementação e calibração, seus resultados devem ser comparados com medidas reais, em locais e instantes de tempo representativos.

A validação do modelo segue o procedimento comparativo entre os dados modelados e observados, a partir de um conjunto de medições de corrente e de parâmetros físicos (temperatura e salinidade) realizado em fevereiro de 2013.

As medições de corrente efetuadas com ADCP nas seções 4 a 11 (Figura 6.3.2-4) e os perfis de temperatura e salinidade foram comparados com os resultados do modelo e são sintetizados nas Tabelas 6.3.2-4 e 6.3.2-5.

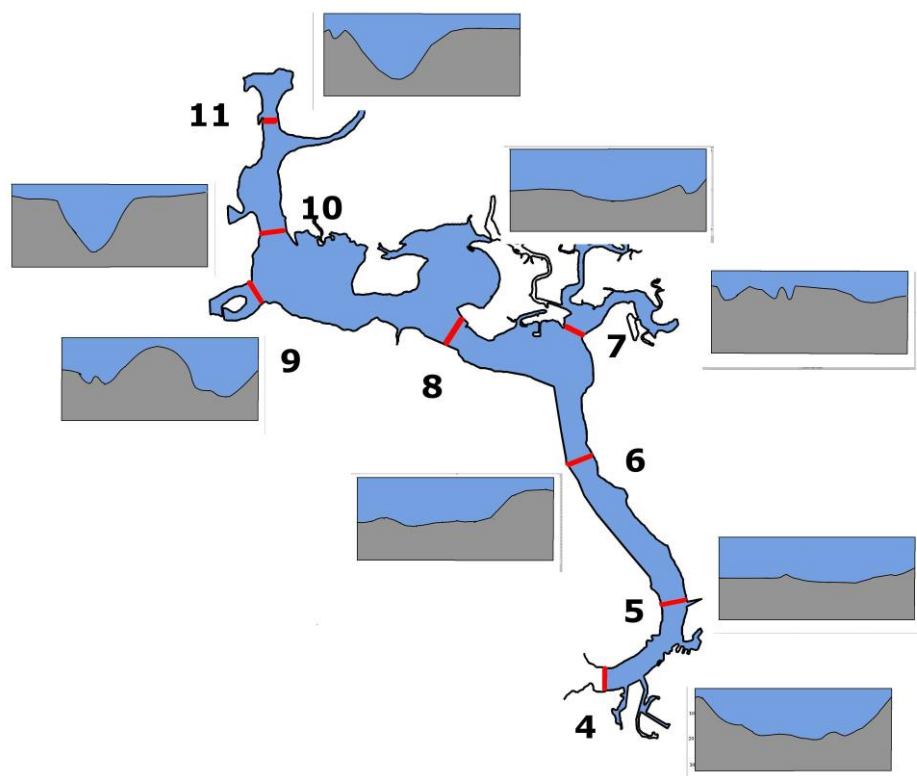


Figura 6.3.2-4. Seções transversais de 4 a 11, com perfil batimétrico.

Os perfis verticais de temperatura e salinidade foram medidos em três pontos (centro do canal, margem esquerda – ME e margem direita – MD) das seções 4 a 11 e estão representados nos gráficos das Figuras 6.3.2-5 a 6.3.2-12. A comparação com os resultados modelados estão sintetizados na

Tabela 6.3.2-4. Cabe salientar que foram utilizados somente os perfis verticais dos pontos centrais das seções (maior profundidade) para essa comparação, sem prejuízo para a avaliação do procedimento de validação do modelo, uma vez que o estuário apresenta estratificação lateral desprezível.

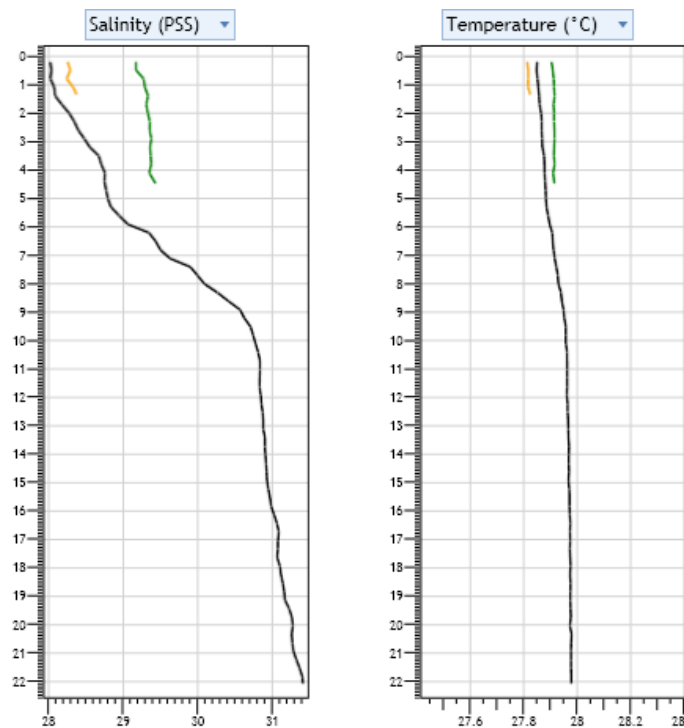


Figura 6.3.2-5. Perfis verticais de salinidade e temperatura da Seção 4 obtidos durante a campanha de medições do dia 27 de fevereiro de 2013. Centro do Canal (preto); MD (verde); ME (laranja).

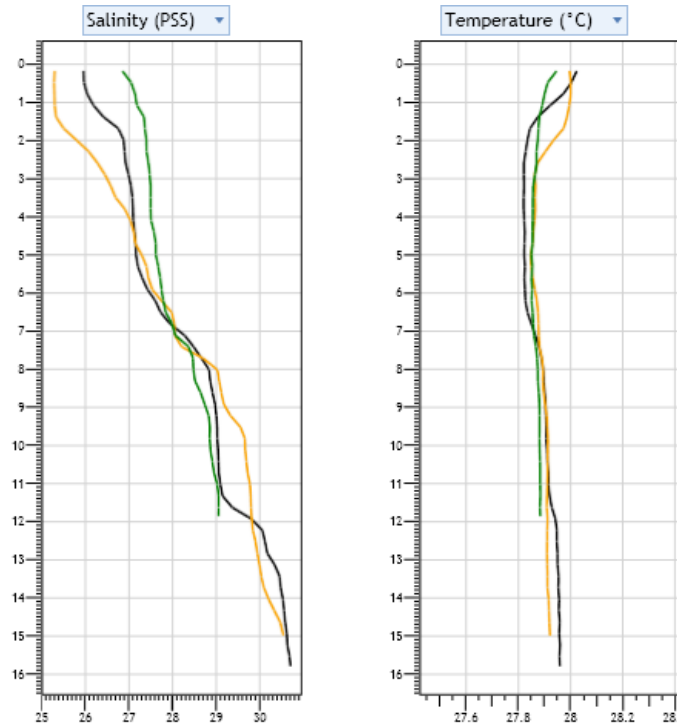


Figura 6.3.2-6. Perfis verticais de salinidade e temperatura da Seção 5 obtidos durante a campanha de medições do dia 27 de fevereiro de 2013. Centro do Canal (preto); MD (verde); ME (laranja).

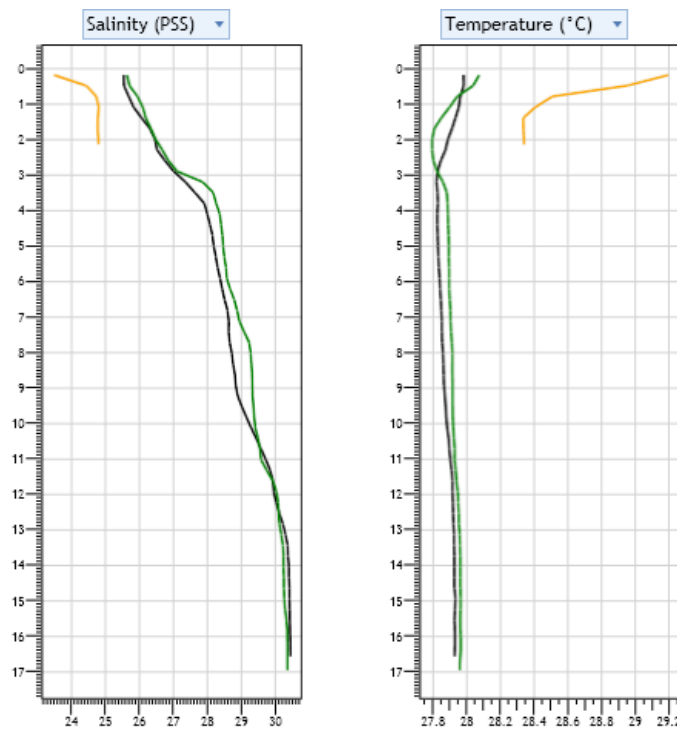


Figura 6.3.2-7. Perfis verticais de salinidade e temperatura da Seção 6 obtidos durante a campanha de medições do dia 27 de fevereiro de 2013. Centro do Canal (preto); MD (verde); ME (laranja).

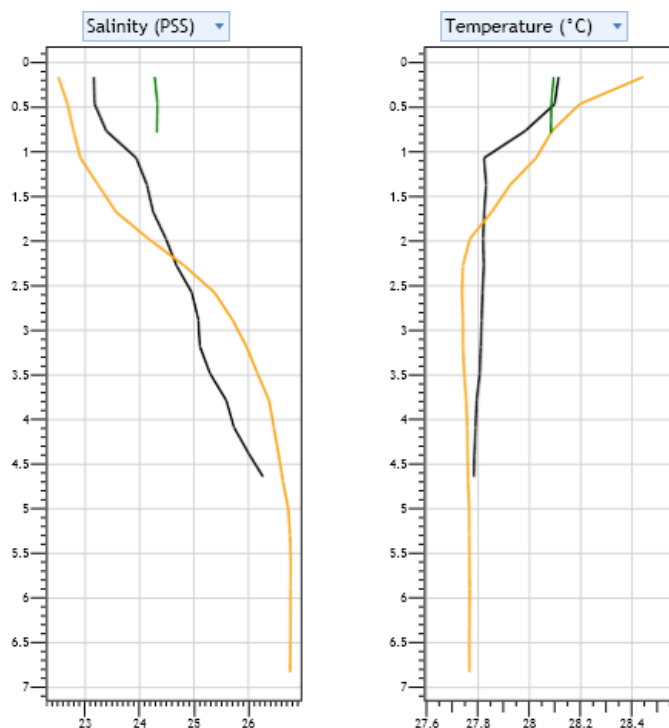


Figura 6.3.2-8. Perfis verticais de salinidade e temperatura da Seção 7 obtidos durante a campanha de medições do dia 27 de fevereiro de 2013. Centro do Canal (preto); MD (verde); ME (laranja).

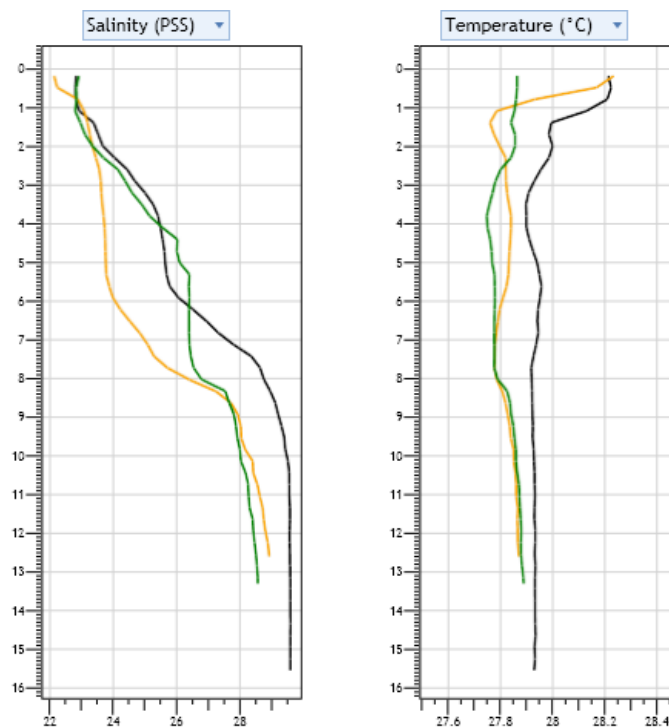


Figura 6.3.2-9. Perfis verticais de salinidade e temperatura da Seção 8 obtidos durante a campanha de medições do dia 27 de fevereiro de 2013. Centro do Canal (preto); MD (verde); ME (laranja).

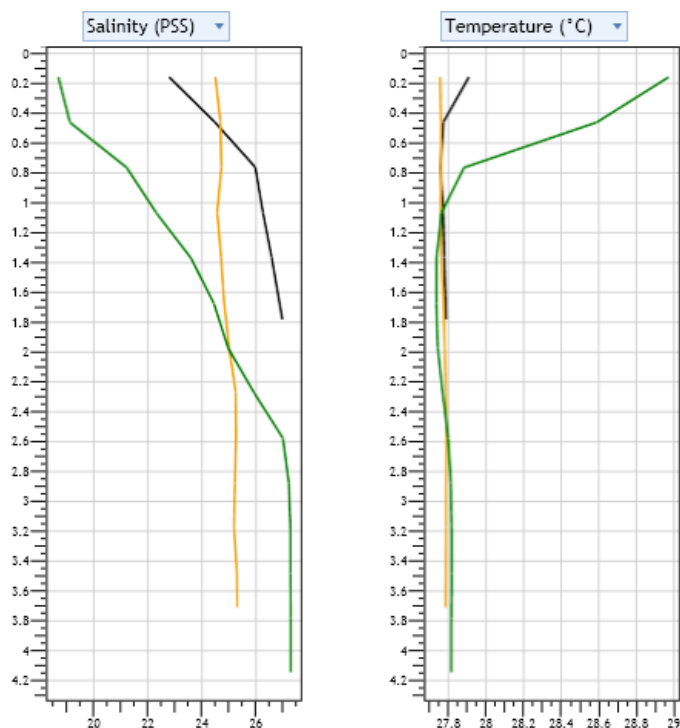


Figura 6.3.2-10. Perfis verticais de salinidade e temperatura da Seção 9 obtidos durante a campanha de medições do dia 27 de fevereiro de 2013. Centro do Canal (preto); MD (verde); ME (laranja).

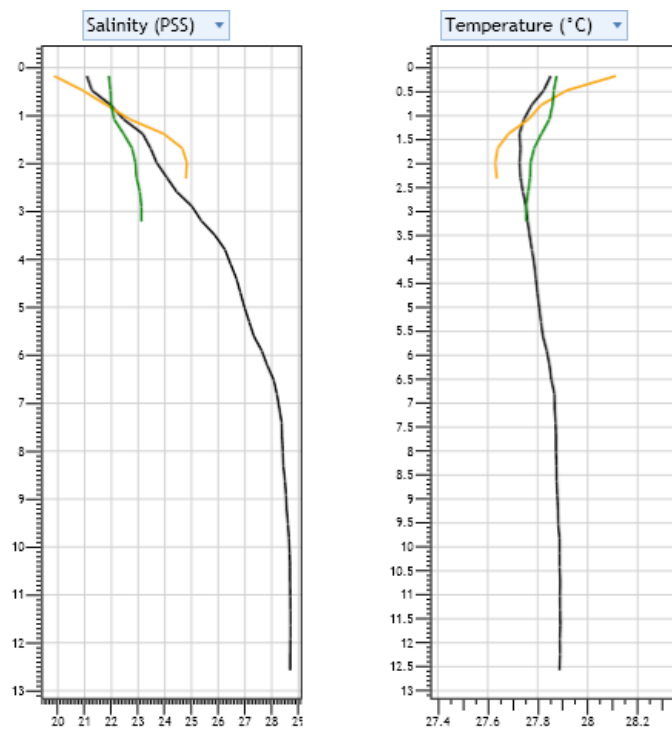


Figura 6.3.2-11. Perfis verticais de salinidade e temperatura da Seção 10 obtidos durante a campanha de medições do dia 27 de fevereiro de 2013. Centro do Canal (preto); MD (verde); ME (laranja).

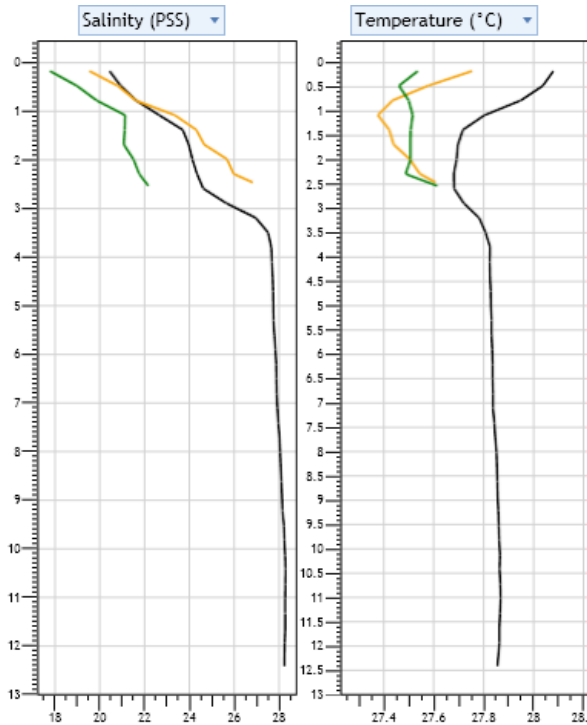


Figura 6.3.2-12. Perfis verticais de salinidade e temperatura da Seção 11 obtidos durante a campanha de medições do dia 27 de fevereiro de 2013. Centro do Canal (preto); MD (verde); ME (laranja).

Na Figura 6.3.2-13 encontra-se o perfil de salinidade resultante das observações realizadas nas 8 seções ao longo do canal de navegação do Porto de Santos, em fevereiro de 2013.

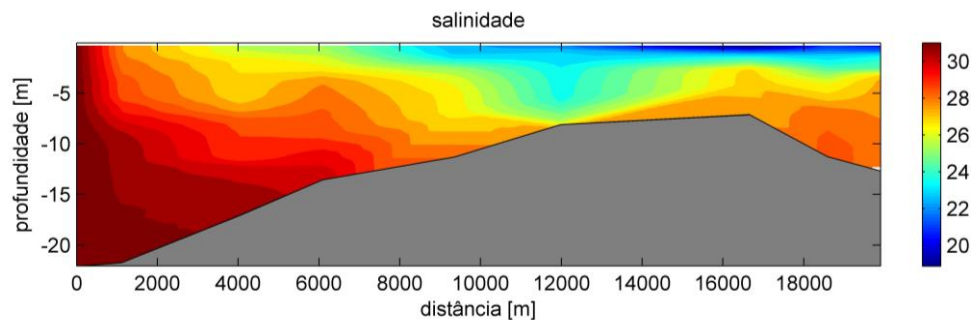


Figura 6.3.2-13. Perfil de salinidade resultante das observações realizadas em 27 de fevereiro de 2013, ao longo do canal de navegação principal do Porto de Santos.

Para validação do modelo, utilizaram-se os dados medidos na campanha de 27 de fevereiro de 2013, comparando-os com a simulação referente ao Caso 8: Vazão de permanência para 10% e marés de sizígia (pós-dragagem).

Tal cenário foi escolhido com base na Análise Sinótica para a América do Sul na data da campanha. A Análise Sinótica para 27 de fevereiro de 2013 12Z identifica um sistema frontal cujo ramo estacionário se estende desde o Paraguai até o centro-leste de Santa Catarina e se conecta ao ramo frio e segue até uma zona de baixa pressão em oclusão de 994 hPa, posicionada em torno de 40° S / 46° W (Atlântico, Argentina). O Anticiclone pós-frontal, associado ao referido sistema, apresenta-se enfraquecido, promovendo tempo estável e ventos fracos na região Sudeste do Brasil (região de estudo). Entretanto, a síntese sinótica para o mês de fevereiro ressalta a ocorrência de uma quinta onda frontal deste mês, ocorrida no dia 22, alcançando o estado de Santa Catarina e causando fortes chuvas na Baixada Santista com transbordamento de rios, desmoronamento de encostas e fechamento de túneis na Rodovia dos Imigrantes (precipitação acumulada de 184 mm).

Os dados de corrente obtidos são comparados com os modelados, considerando a influência da maré de sizígia e, portanto, garantindo a consistência da comparação. Ainda, os dados modelados são comparados aos medidos em horário compatível com o instante da maré em que a medição foi realizada.

Tabela 6.3.2-4. Valores de corrente média integrada na profundidade e respectivos desvios percentuais das seções 4 a 11 (S4 a S11).

seção	hora	velocidade medida (m/s)		velocidade modelada (m/s)		Desvio da modelagem (%)	
		comp. x	comp. y	comp. x	comp. y	comp. x	comp. y
S4	9:00h	-0.13	-0.14	-0.16	-0.16	16	10
S5	11:00h	0.01	0.33	0.01	0.24	-3	-38
S6	12:00h	-0.06	0.22	-0.07	0.17	18	-28
S7	12:30h	0.1	0.15	0.10	0.18	-5	16
S8	13:30h	-0.09	0.07	-0.09	0.05	-5	-31
S9	14:30h	-0.14	-0.03	-0.16	-0.04	13	21
S10	15:00h	-0.02	0.13	-0.02	0.15	8	15
S11	15:30h	0.01	-0.03	0.01	-0.02	-36	-20

Tabela 6.3.2-5. Valores de salinidade média, salinidade na haloclina e profundidade da haloclina medidos e modelados das seções 4 a 11 (S4 a S11).

seção	hora	salinidade média na coluna		salinidade na haloclina		profundidade da haloclina (m)	
		medida	modelo	medida	modelo	medida	modelo
S4	9:00h	30.1	29.5	30.6	29.0	9.0	5.0
S5	11:00h	28.8	29.0	29.0	29.0	9.0	8.0
S6	12:00h	28.8	29.5	28.3	26.5	4.0	4.5
S7	12:30h	25.4	27.0	28.4	27.0	2.5	3.5
S8	13:30h	26.5	27.0	25.8	23.0	6.0	3.0
S9	14:30h	24.9	25.5	26.6	24.5	3.0	3.0
S10	15:00h	27.2	26.0	28.8	26.0	7.0	5.0
S11	15:30h	27.0	27.0	27.7	26.5	4.0	6.0

Síntese da Validação do Modelo

Utilizando o método proposto por Willmott (1981) para a avaliação da qualidade da modelagem, o parâmetro SKILL foi calculado como descrito no item 6.2.5 deste relatório.

O valor do parâmetro SKILL foi de 0.87, indicando boa aderência entre os valores modelados e observados.

6.3.3. Resultados do Modelo

Os resultados do modelo, apresentados a seguir, referem-se aos 8 casos citados anteriormente e apresentados na Tabela 6.2.3-2. A fim de facilitar comparações e interpretações, a sequência de apresentação dos casos segue a apresentada na Tabela 6.3.3-1.

Os resultados das modelagens, antes e depois da dragagem, para o fenômeno de levantamento do nível do mar causado pela passagem de frentes frias via Transporte de Ekman (fenômeno conhecido como “ressaca”) não contribuíram significativamente para as alterações estudadas.

Tabela 6.3.3-1. Sequência de apresentação dos casos de 1 a 8 e síntese das combinações para cada caso estudado.

Caso	Situação Pretérita	Pós-dragagem	Vazão Média L.T.	Vazão Permanência 10%	Maré Quadratura	Maré Sizígia
1	✓		✓		✓	
5		✓	✓		✓	
2	✓			✓	✓	
6		✓		✓	✓	
3	✓		✓			✓
7		✓	✓			✓
4	✓			✓		✓
8		✓		✓		✓

Caso 1: Situação Pretérita, Vazão Média de Longo Termo e Maré de Quadratura

A sequência de figuras representativas dos resultados deste caso (Figuras 6.3.3-1 a 6.3.3-5) considera a simulação com valor de vazão média de longo termo e o período de maré de quadratura, quando os efeitos da maré são mais reduzidos. Esta situação nos permite avaliar a maior influência da descarga estuarina em comparação ao efeito da maré.

O valor médio de penetração da frente (cunha) salina foi de 9,7 km, com valor médio de salinidade que a define igual a $S = 23,2$ (correspondente ao máximo gradiente).

A Figura 6.3.3-2 mostra o perfil vertical de salinidade desde a entrada do canal estuarino (Ponta da Praia) até o fim do Canal de Piaçaguera, enquanto a Figura 6.3.3-3 mostra a distribuição de salinidade na superfície do canal estuarino. O máximo gradiente, que define a frente estuarina, está indicado pelo valor correspondente de salinidade. As informações sobre as situações de preamar e de baixamar encontram-se nas legendas das figuras e nelas esperamos que haja, respectivamente, maior penetração e retração da frente salina no estuário, ainda que desprezível em algumas situações.

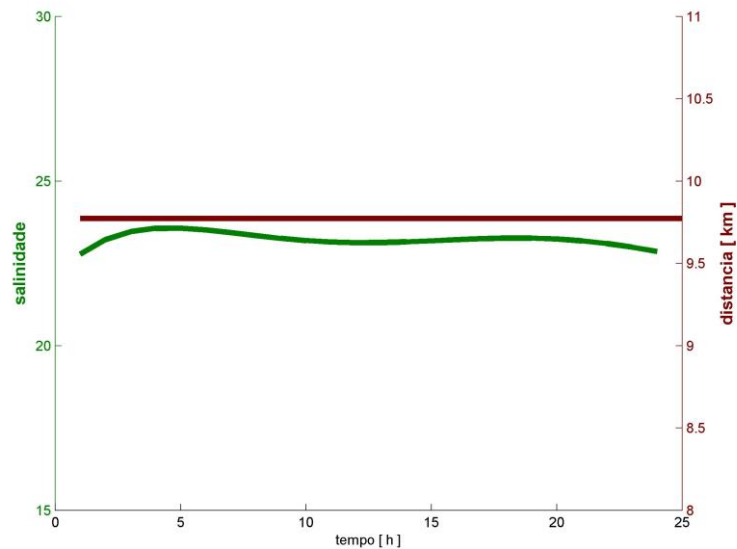


Figura 6.3.3-1. Evolução da excursão da maré no canal do Porto de Santos, durante 2 ciclos semidiurnos (25 horas), para o Caso 1 (situação pretérita). (—) salinidade na cunha salina (máximo gradiente); (—) excursão da maré (em metros) desde entrada do canal até a região de máximo gradiente de salinidade.

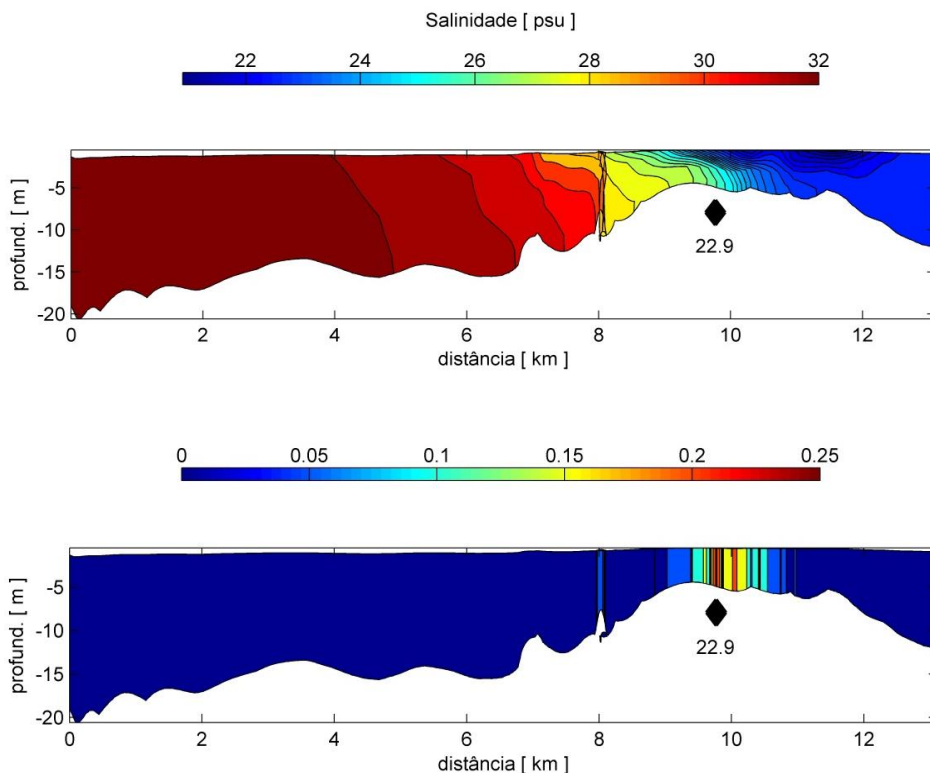


Figura 6.3.3-2. Perfis verticais de salinidade (painel superior) e de gradiente longitudinal de salinidade (m^{-1}) (painel inferior), desde a entrada do porto (0 km) até a bacia de evolução no Canal de Piaçaguera (13 km). Caso 1 - situação pretérita, vazão média de longo termo; maré de quadratura; $t=273$ h / baixamar. ♦ - frente estuarina.

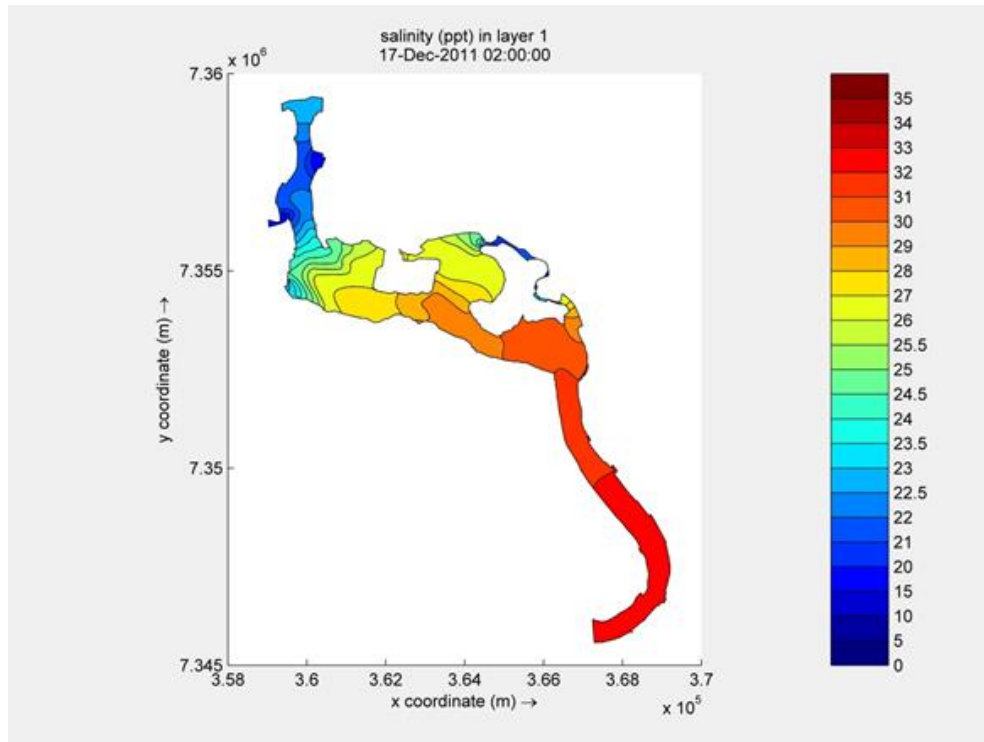


Figura 6.3.3-3. Distribuição superficial de salinidade para o Caso 1 - situação pretérita, vazão média de longo termo; maré de quadratura; $t=273$ h / baixamar.

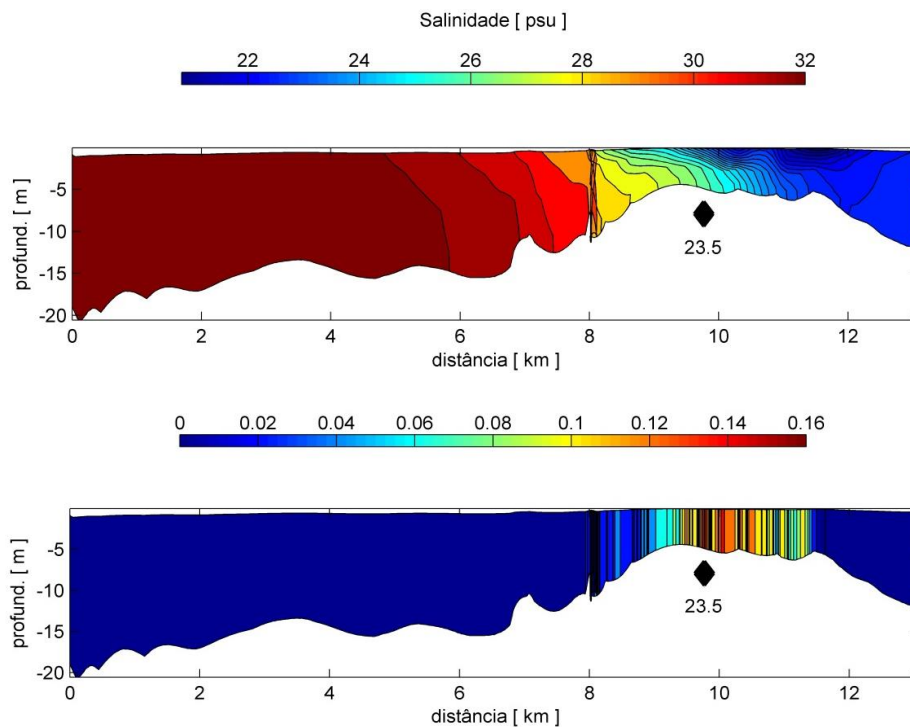


Figura 6.3.3-4. Perfis verticais de salinidade (painel superior) e de gradiente longitudinal de salinidade (m^{-1}) (painel inferior), desde a entrada do porto (0 km) até a bacia de evolução no Canal de Piaçaguera (13 km). Caso 1 - situação pretérita, vazão média de longo termo; maré de quadratura; $t=273$ h / preamar. ♦ - frente estuarina.

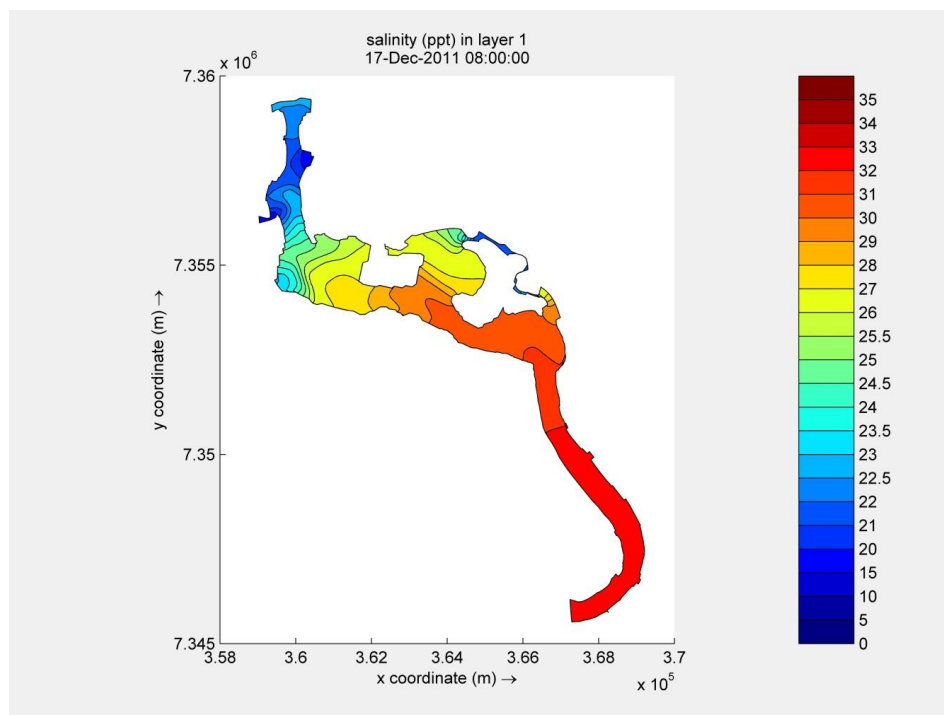


Figura 6.3.3-5. Distribuição superficial de salinidade. Caso 1 - situação pretérita, vazão média de longo termo; maré de quadratura; $t=273$ h / preamar.

Caso 5: Situação Pós-dragagem, Vazão Média de Longo Termo e Maré de Quadratura

A sequência de figuras representativas dos resultados deste caso (Figuras 6.3.3-6 a 6.4.2-10) considera a simulação com valor de vazão média de longo termo e o período de maré de quadratura, quando os efeitos da maré são mais reduzidos. Essa situação nos permite avaliar a maior influência da descarga estuarina em comparação ao efeito da maré.

O valor médio de penetração da frente (cunha) salina foi de 10,0 km, com valor médio de salinidade que a define igual a $S = 24,6$ (correspondente ao máximo gradiente).

A Figura 6.3.3-7 mostra o perfil vertical de salinidade desde a entrada do canal estuarino (Ponta da Praia) até o fim do Canal de Piaçaguera, enquanto a Figura 6.4.2-8 mostra a distribuição de salinidade na superfície do canal estuarino. O máximo gradiente, que define a frente estuarina, está indicado pelo valor correspondente de salinidade. As informações sobre as situações de

preamar e de baixamar encontram-se nas legendas das figuras e nelas esperamos que haja, respectivamente, maior penetração e retração da frente salina no estuário, ainda que desprezível em algumas situações.

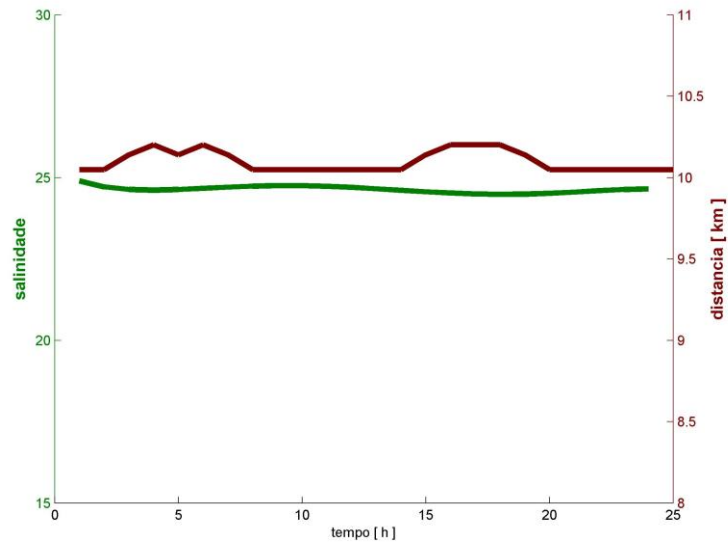


Figura 6.3.3-6. Evolução da excursão da maré no canal do Porto de Santos, durante 2 ciclos semidiurnos (25 horas), para o Caso 5 (situação pós-dragagem). (—) salinidade na cunha salina (máximo gradiente); (—) excursão da maré (em metros) desde entrada do canal até a região de máximo gradiente de salinidade.

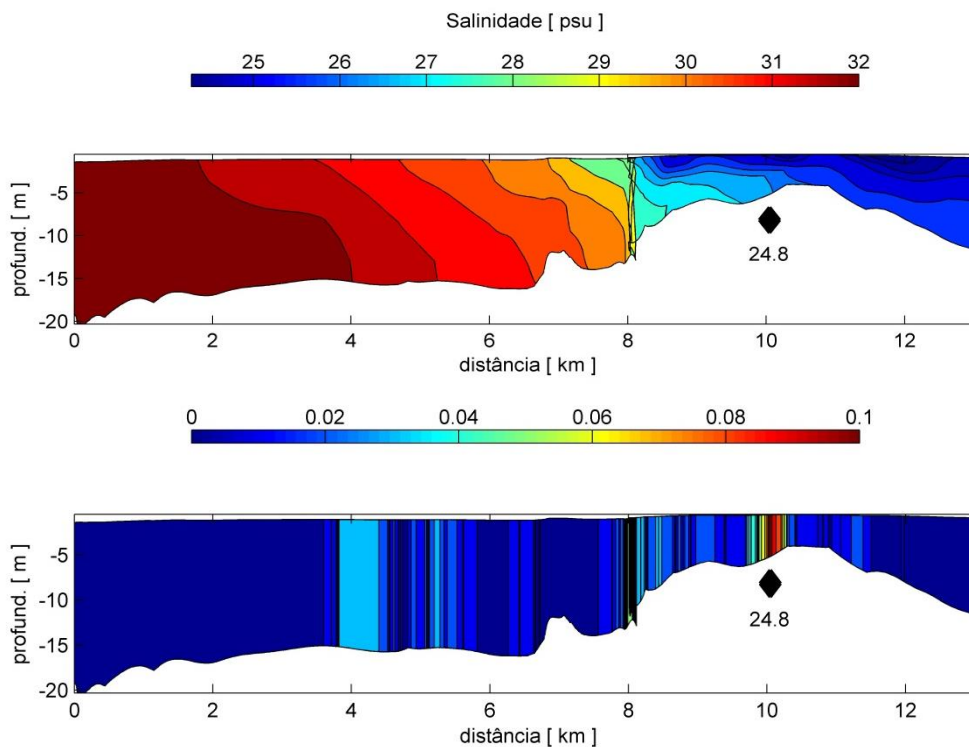


Figura 6.3.3-7. Perfis verticais de salinidade (painel superior) e de gradiente longitudinal de salinidade (m^{-1}) (painel inferior), desde a entrada do porto (0 km) até a bacia de evolução no Canal de Piaçaguera (13 km). Caso 5 – pós-dragagem, vazão média de longo termo; maré de quadratura; $t=267$ h / baixamar. ♦ - frente estuarina.

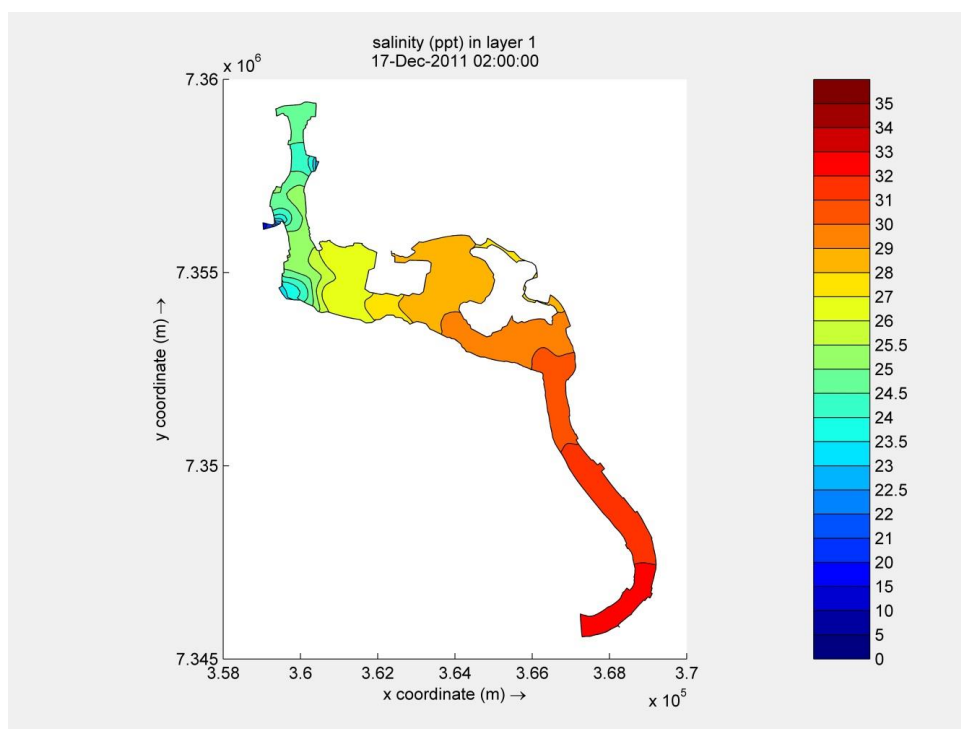


Figura 6.3.3-8. Distribuição superficial de salinidade para o Caso 5 – pós-dragagem, vazão média de longo termo; maré de quadratura; $t=267$ h / baixamar.

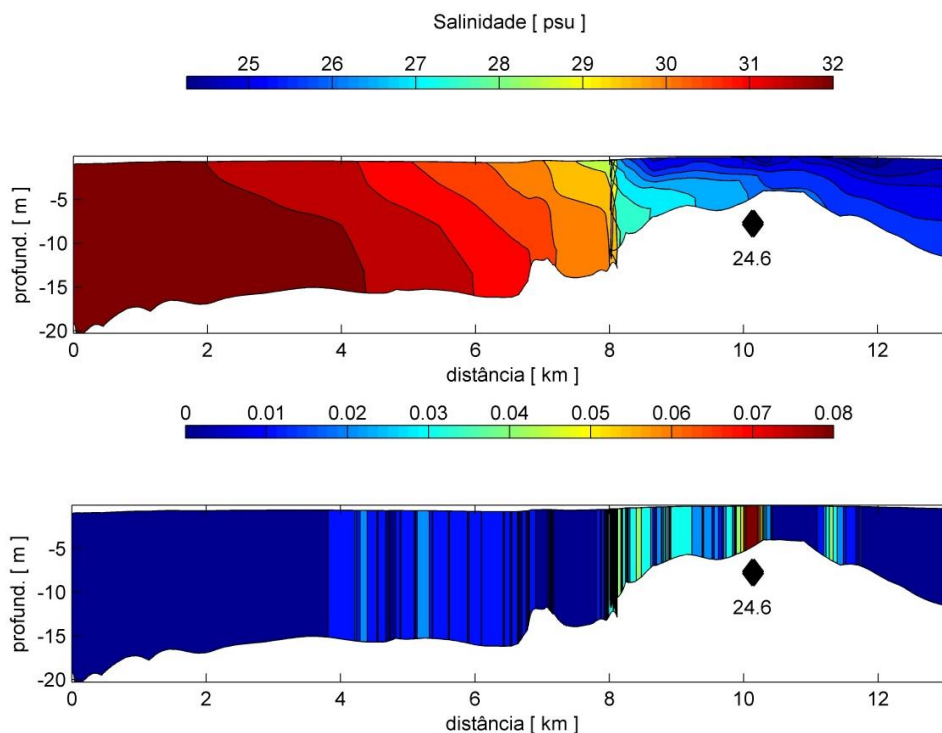


Figura 6.3.3-9. Perfis verticais de salinidade (painel superior) e de gradiente longitudinal de salinidade (m^{-1}) (painel inferior), desde a entrada do porto (0 km) até a baía de evolução no Canal de Piaçaguera (13 km). Caso 5 – pós-dragagem, vazão média de longo termo; maré de quadratura; $t=273h$ / preamar.

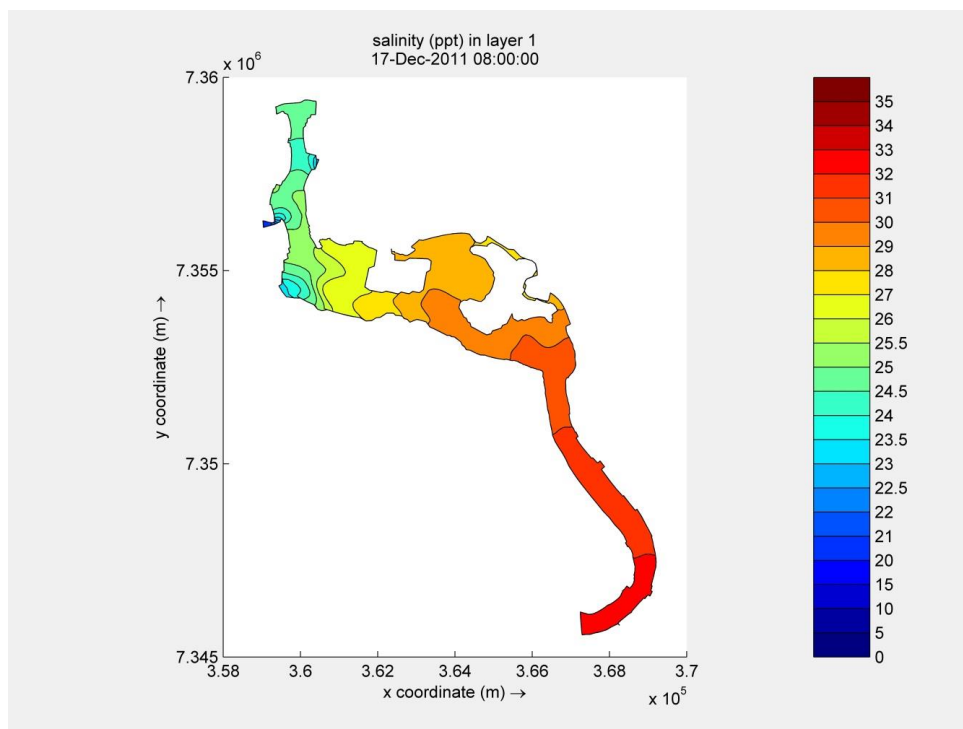


Figura 6.3.3-10. Distribuição superficial de salinidade para o Caso 5 – pós-dragagem, vazão média de longo termo; maré de quadratura; $t=273h$ / preamar.

Caso 2: Situação Pretérita, Vazão de permanência para 10% e Maré de Quadratura

A sequência de figuras representativas dos resultados deste caso (Figuras 6.3.3-11 a 6.3.3-15) considera a simulação com valor de vazão de permanência de 10% e o período de maré de quadratura, quando os efeitos da maré são mais reduzidos. Essa situação nos permite avaliar a maior influência da descarga estuarina em comparação ao efeito da maré.

O valor médio de penetração da frente (cunha) salina foi de 9,7 km, com valor médio de salinidade que a define igual a $S = 18,5$ (correspondente ao máximo gradiente).

A Figura 6.3.3-12 mostra o perfil vertical de salinidade desde a entrada do canal estuarino (Ponta da Praia) até o fim do Canal de Piaçaguera, enquanto a Figura 6.4.1-13 mostra a distribuição de salinidade na superfície do canal estuarino. O máximo gradiente, que define a frente estuarina, está indicado pelo valor correspondente de salinidade. As informações sobre as situações de preamar e de baixamar encontram-se nas legendas das figuras e nelas esperamos que haja, respectivamente, maior penetração e retração da frente salina no estuário, ainda que desprezível em algumas situações.

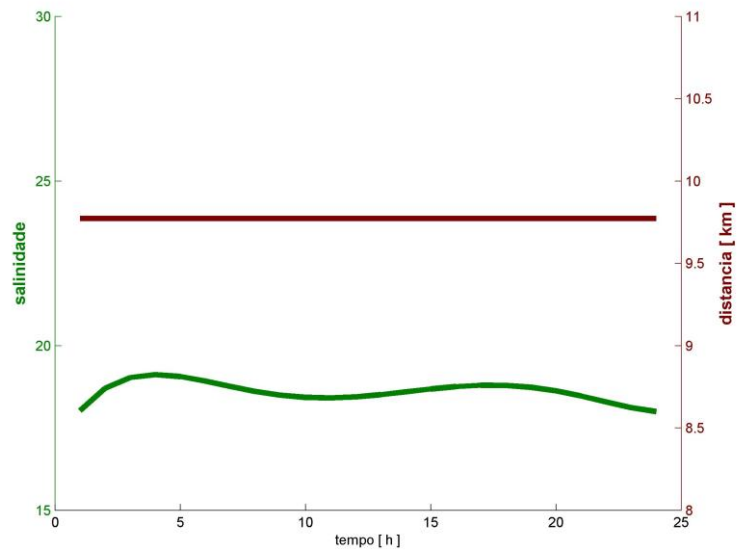


Figura 6.3.3-11. Evolução da excursão da maré no canal do Porto de Santos, durante 2 ciclos semidiurnos (25 horas), para o Caso 2 (situação pretérita). (—) salinidade na cunha salina (máximo gradiente); (—) excursão da maré (em metros) desde entrada do canal até a região de máximo gradiente de salinidade.

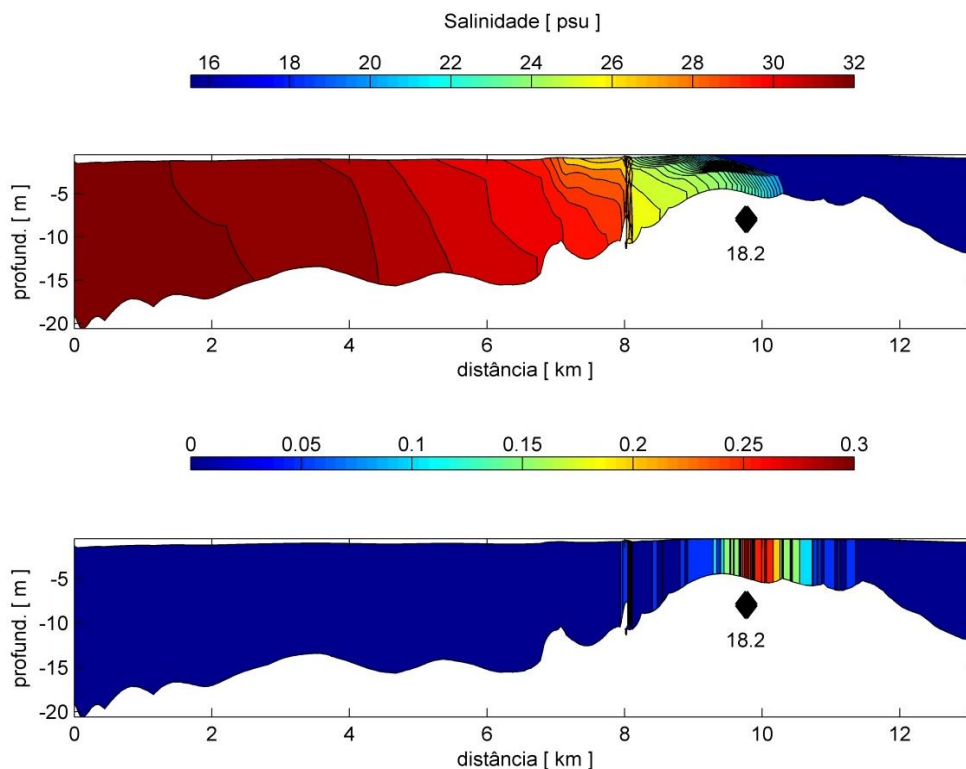


Figura 6.3.3-12. Perfis verticais de salinidade (painel superior) e de gradiente longitudinal de salinidade (m^{-1}) (painel inferior), desde a entrada do porto (0 km) até a bacia de evolução no Canal de Piaçaguera (13 km). Caso 2 – situação pretérita, vazão de permanência de 10%; maré de quadratura; $t=273$ h / baixamar. ♦ - frente estuarina.

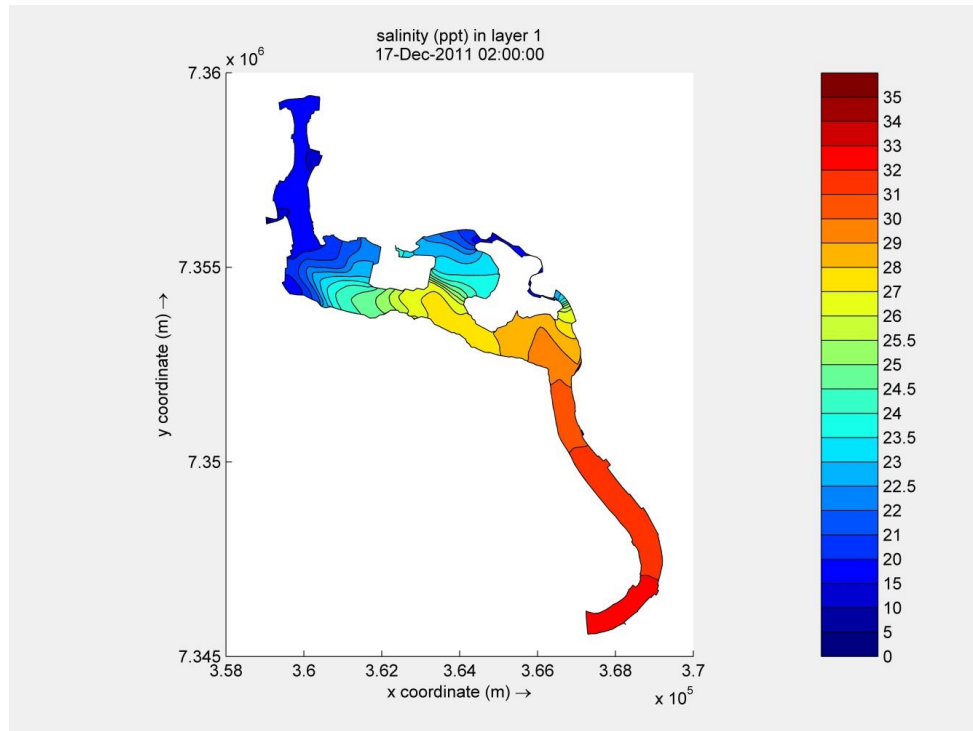


Figura 6.3.3-13. Distribuição superficial de salinidade para o Caso 2 – situação pretérita, vazão de permanência 10%; maré de quadratura; $t=273$ h / baixamar.

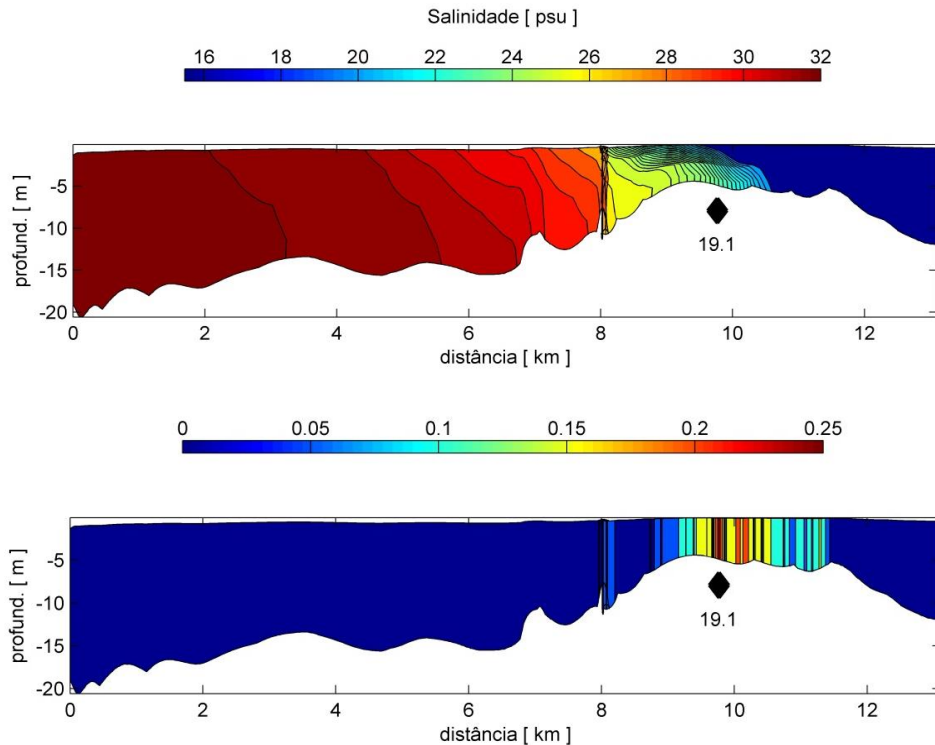


Figura 6.3.3-14. Perfis verticais de salinidade (painel superior) e de gradiente longitudinal de salinidade (m^{-1}) (painel inferior), desde a entrada do porto (0 km) até a bacia de evolução no Canal de Piaçaguera (13 km). Caso 2 – situação pretérita, vazão de permanência 10%; maré de quadratura; $t=273$ h / preamar. ♦ - frente estuarina.

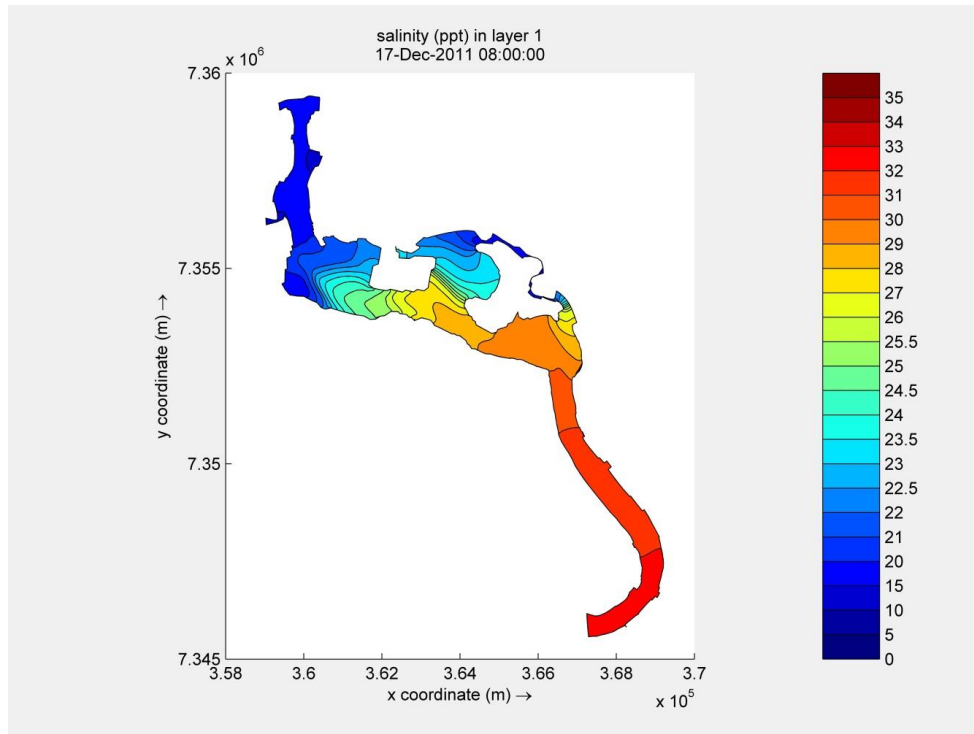


Figura 6.3.3-15. Distribuição superficial de salinidade para o Caso 2 – situação pretérita, vazão de permanência 10%; maré de quadratura; $t=273$ h / preamar.

Caso 6: Situação Pós-dragagem, Vazão de Permanência para 10% e Maré de Quadratura

A sequência de figuras representativas dos resultados deste caso (Figuras 6.3.3-16 a 6.3.3-20) considera a simulação com valor de vazão de permanência de 10% e o período de maré de quadratura, quando os efeitos da maré são mais reduzidos. Essa situação nos permite avaliar a maior influência da descarga estuarina em comparação ao efeito da maré.

O valor médio de penetração da frente (cunha) salina foi de 10,0 km, com valor médio de salinidade que a define igual a $S = 20,5$ (correspondente ao máximo gradiente).

A Figura 6.3.3-17 mostra o perfil vertical de salinidade desde a entrada do canal estuarino (Ponta da Praia) até o fim do Canal de Piaçaguera, enquanto a Figura 6.3.3-18 mostra a distribuição de salinidade na superfície do canal estuarino. O máximo gradiente, que define a frente estuarina, está indicado pelo valor correspondente de salinidade. As informações sobre as situações de preamar e de baixamar encontram-se nas legendas das figuras e nelas

esperamos que haja, respectivamente, maior penetração e retração da frente salina no estuário, ainda que desprezível em algumas situações.

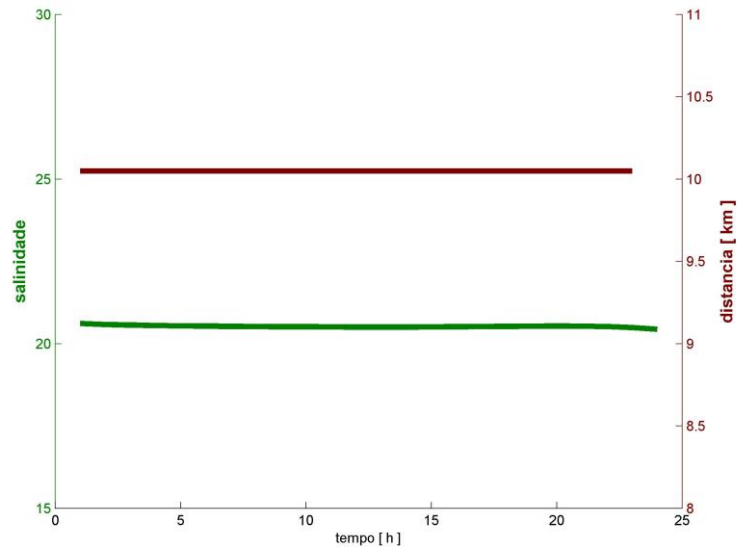


Figura 6.3.3-16. Evolução da excursão da maré no canal do Porto de Santos, durante 2 ciclos semidiurnos (25 horas), para o Caso 6 (pós-dragagem). (—) salinidade na cunha salina (máximo gradiente); (—) excursão da maré (em metros) desde entrada do canal até a região de máximo gradiente de salinidade.

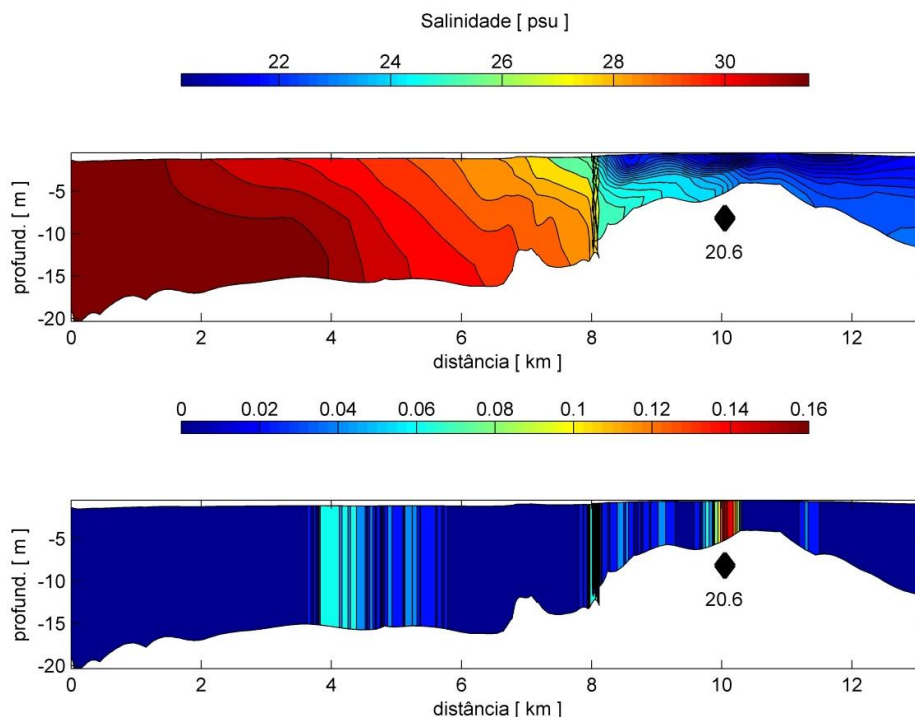


Figura 6.3.3-17. Perfis verticais de salinidade (painel superior) e de gradiente longitudinal de salinidade (m^{-1}) (painel inferior), desde a entrada do porto (0 km) até a bacia de evolução no Canal de Piaçaguera (13 km). Caso 6 – pós-dragagem, vazão de permanência 10%; maré de quadratura; $t=267$ h / baixamar. ♦ - frente estuarina.

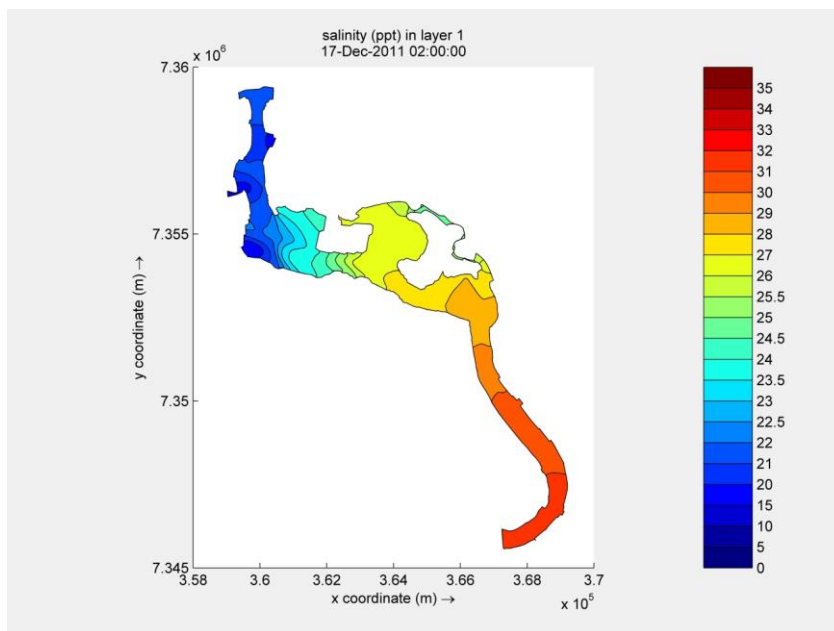


Figura 6.3.3-18. Distribuição superficial de salinidade para Caso 6 – pós-dragagem: Vazão de permanência 10%; maré de quadratura; $t=267$ h / baixamar.

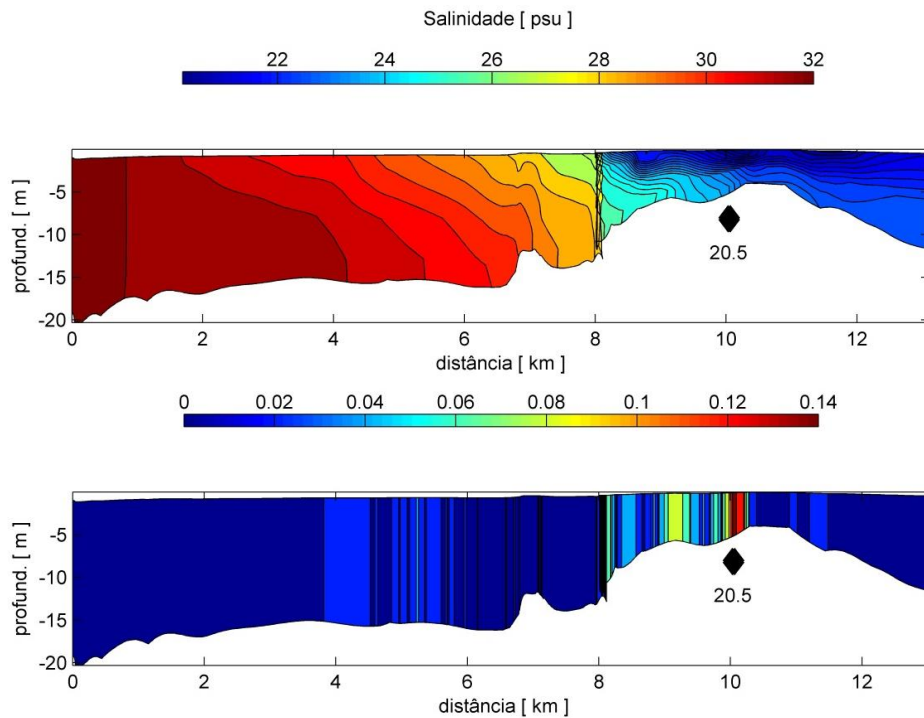


Figura 6.3.3-19. Perfis verticais de salinidade (painel superior) e de gradiente longitudinal de salinidade (m^{-1}) (painel inferior), desde a entrada do porto (0 km) até a bacia de evolução no Canal de Piaçaguera (13 km). Caso 6 – pós-dragagem, vazão de permanência 10%; maré de quadratura; $t=273$ h / preamar. ♦ - frente estuarina.

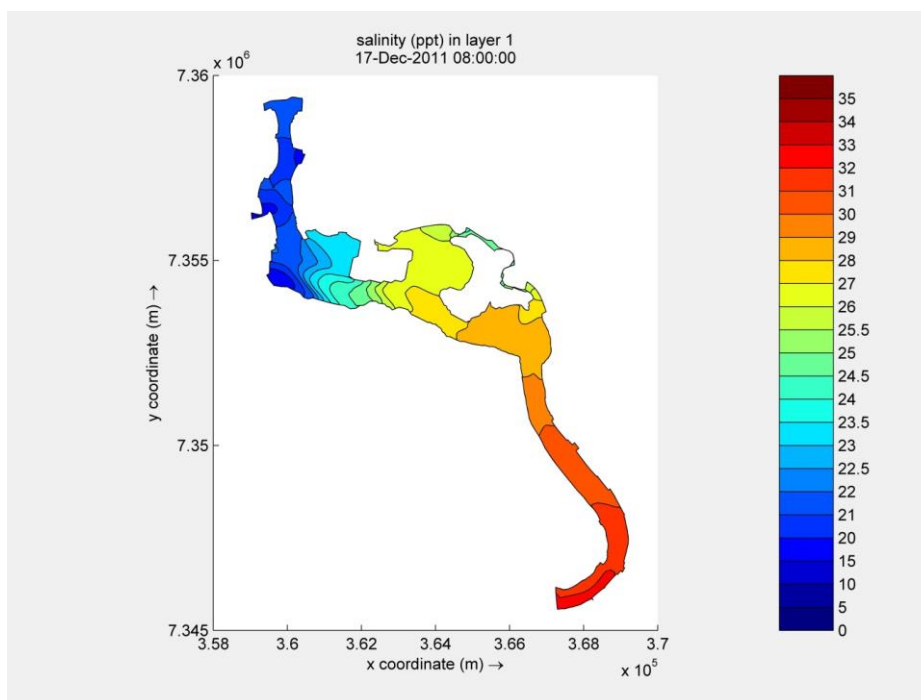


Figura 6.3.3-20. Distribuição superficial de salinidade para Caso 6 – pós-dragagem, vazão de permanência 10%; maré de quadratura; $t=273$ h / preamar.

Caso 3: Situação Pretérita, Vazão Média de Longo Termo e Maré de Sizígia

A sequência de figuras representativas dos resultados deste caso (Figuras 6.3.3-21 a 6.3.3-25) considera a simulação com valor de vazão média de longo termo e o período de maré de sizígia, quando os efeitos da maré são mais intensos, uma vez que a energia das correntes e as variações do nível do mar são maiores. Esta situação nos permite avaliar a maior influência da maré sobre a descarga estuarina.

O valor médio de penetração da frente (cunha) salina foi de 10,3 km, com valor médio de salinidade que a define igual a $S = 23,4$ (correspondente ao máximo gradiente).

A Figura 6.3.3-22 mostra o perfil vertical de salinidade desde a entrada do canal estuarino (Ponta da Praia) até o fim do Canal de Piaçaguera, enquanto a Figura 6.3.3-23 mostra a distribuição de salinidade na superfície do canal estuarino. O máximo gradiente, que define a frente estuarina, está indicado pelo valor correspondente de salinidade. As informações sobre as situações de preamar e de baixamar encontram-se nas legendas das figuras e nelas esperamos que haja, respectivamente, maior penetração e retração da frente salina no estuário, ainda que desprezível em algumas situações.

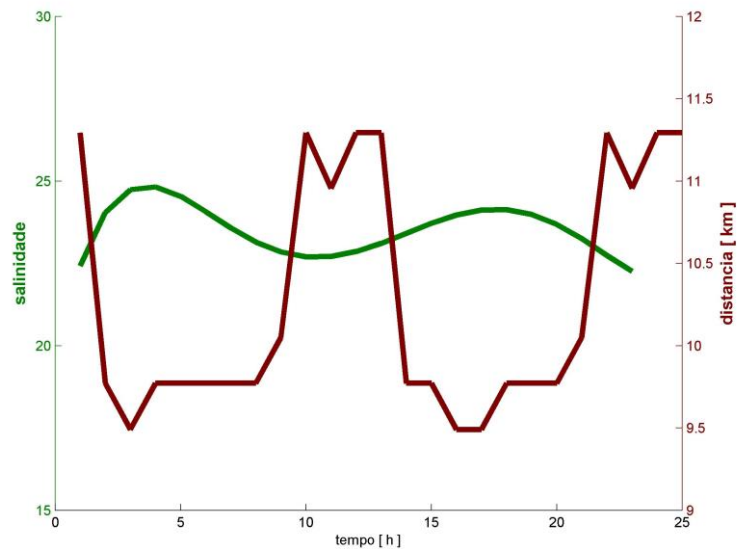


Figura 6.3.3-21. Evolução da excursão da maré no canal do Porto de Santos, durante 2 ciclos semidiurnos (25 horas), para o Caso 3 (situação pretérita). (—) salinidade na cunha salina (máximo gradiente); (—) excursão da maré (em metros) desde entrada do canal até a região de máximo gradiente de salinidade.

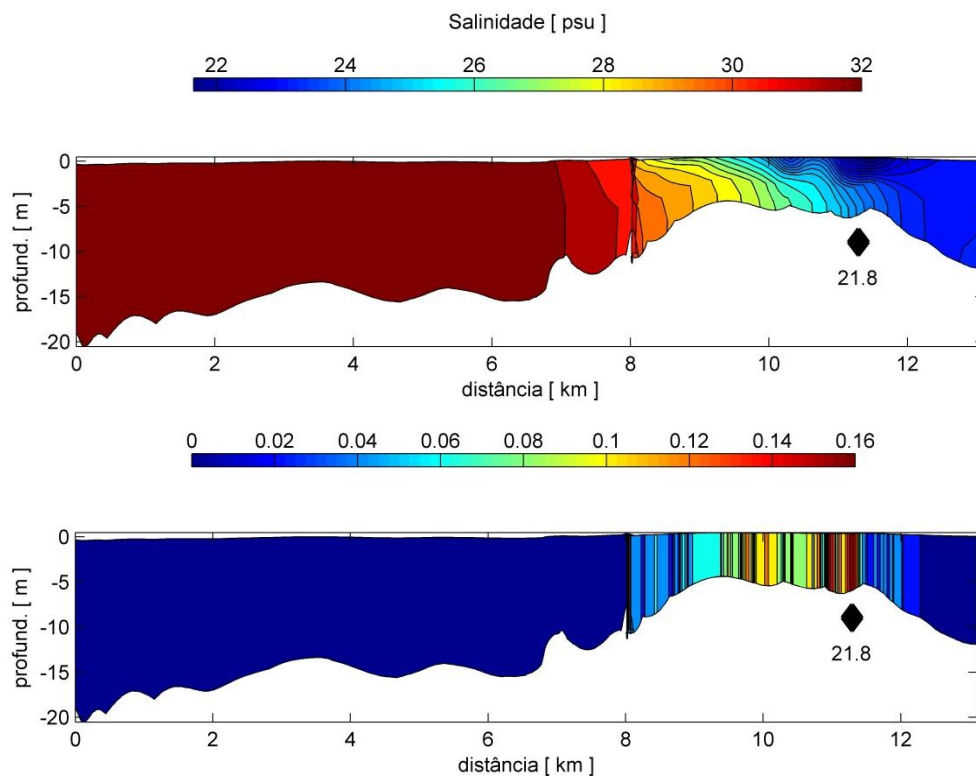


Figura 6.3.3-22. Perfis verticais de salinidade (painel superior) e de gradiente longitudinal de salinidade (m^{-1}) (painel inferior), desde a entrada do porto (0 km) até a bacia de evolução no Canal de Piaçaguera (13 km). Caso 3 – situação pretérita, vazão média de longo termo; maré de sizígia; $t=106$ h / preamar. ♦ - frente estuarina.

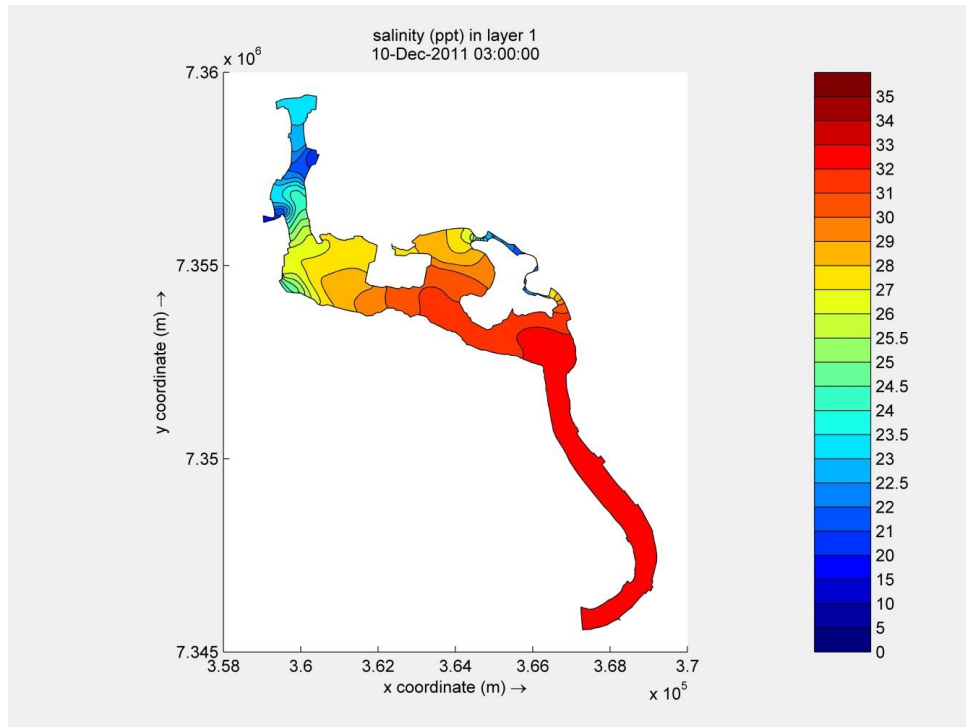


Figura 6.3.3.23. Distribuição superficial de salinidade para Caso 3 – situação pretérita, média de longo termo; maré de sizígia; $t=273$ h / preamar.

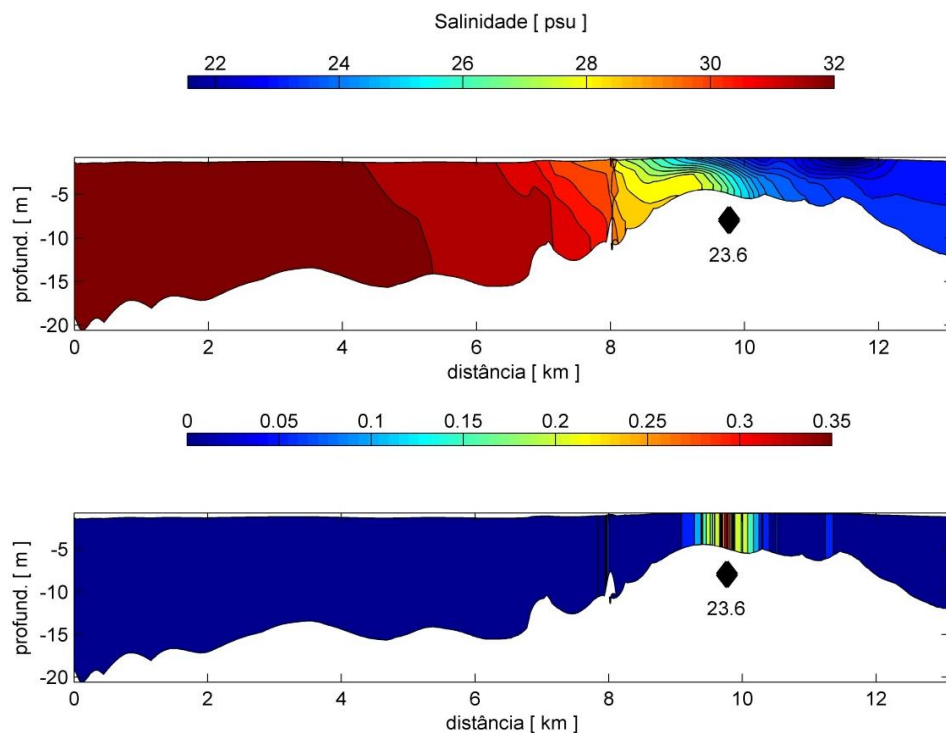


Figura 6.3.3-24. Perfis verticais de salinidade (painel superior) e de gradiente longitudinal de salinidade (m^{-1}) (painel inferior), desde a entrada do porto (0 km) até a bacia de evolução no Canal de Piaçaguera (13 km). Caso 3 – situação pretérita, vazão média de longo termo; maré de sizígia; $t=106$ h / baixamar. ♦ - frente estuarina.

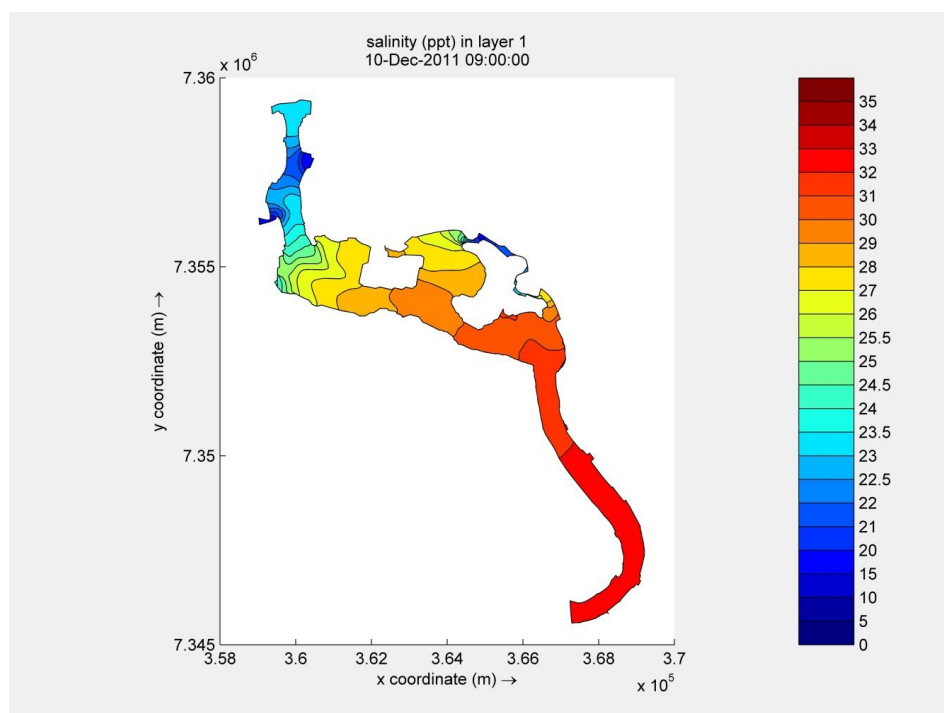


Figura 6.3.1-25. Distribuição superficial de salinidade para Caso 3 – situação pretérita, vazão média de longo termo; maré de sizígia; t=273 h / baixamar.

Caso 7: Situação Pós-dragagem, Vazão Média de Longo Termo e Maré de Sizígia

A sequência de figuras representativas dos resultados deste caso (Figuras 6.3.3-26 a 6.3.3-30) considera a simulação com valor de vazão média de longo termo e o período de maré de sizígia, quando os efeitos da maré são mais intensos, uma vez que a energia das correntes e as variações do nível do mar são maiores. Essa situação nos permite avaliar a maior influência da maré sobre a descarga estuarina.

O valor médio de penetração da frente (cunha) salina foi de 9,5 km, com valor médio de salinidade que a define igual a $S = 25,9$ (correspondente ao máximo gradiente).

A Figura 6.3.3-27 mostra o perfil vertical de salinidade desde a entrada do canal estuarino (Ponta da Praia) até o fim do Canal de Piaçaguera, enquanto a Figura 6.3.3-28 mostra a distribuição de salinidade na superfície do canal estuarino. O máximo gradiente, que define a frente estuarina, está indicado pelo

valor correspondente de salinidade. As informações sobre as situações de preamar e de baixamar encontram-se nas legendas das figuras e nelas esperamos que haja, respectivamente, maior penetração e retração da frente salina no estuário, ainda que desprezível em algumas situações.

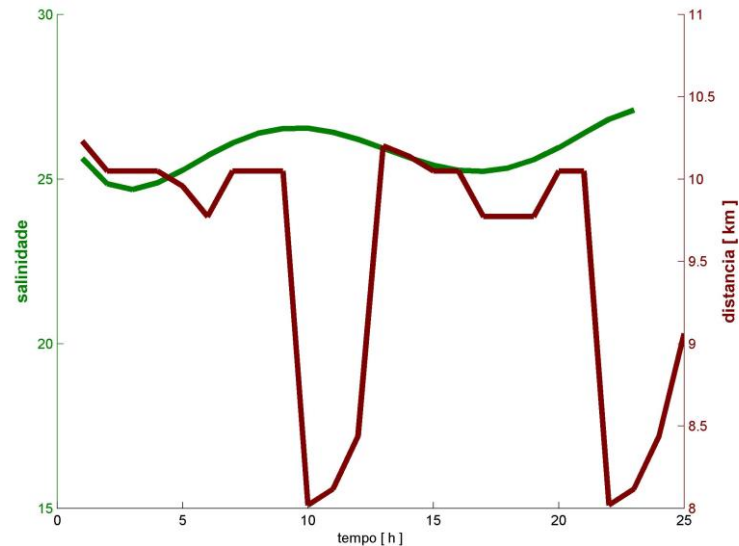


Figura 6.3.3-26. Evolução da excursão da maré no canal do Porto de Santos, durante 2 ciclos semidiurnos (25 horas), para o Caso 7 (pós-dragagem). (—) salinidade na cunha salina (máximo gradiente); (—) excursão da maré (em metros) desde entrada do canal até a região de máximo gradiente de salinidade.

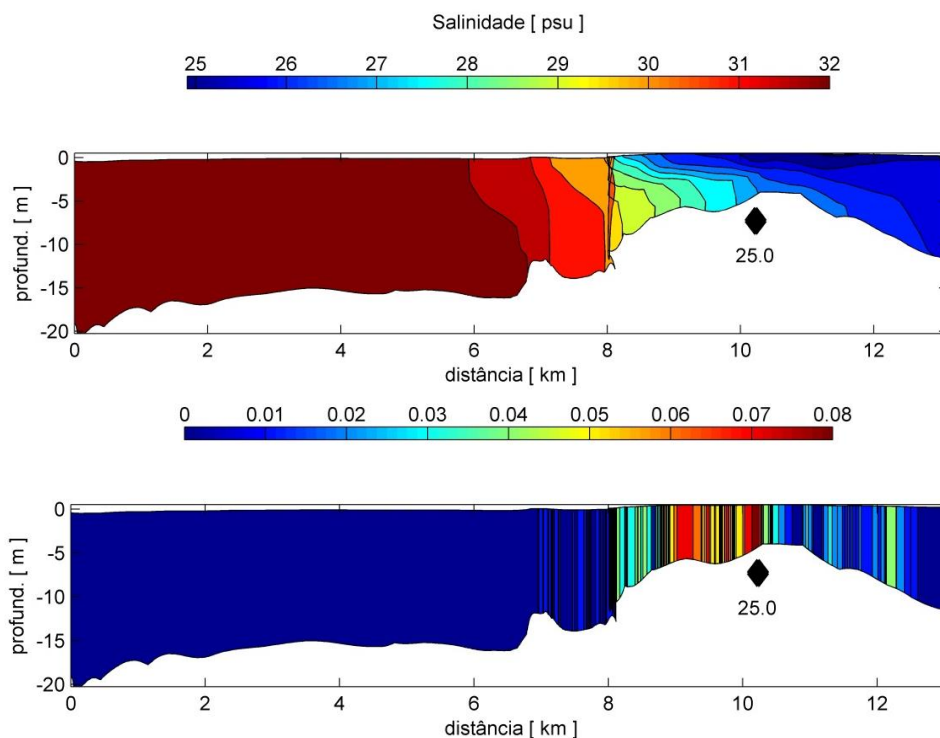


Figura 6.3.3-27. Perfis verticais de salinidade (painel superior) e de gradiente longitudinal de salinidade (m^{-1}) (painel inferior), desde a entrada do porto (0 km) até a bacia de evolução no Canal de Piaçaguera (13 km). Caso 7 – pós-dragagem, vazão média de longo termo; maré de sizígia; $t=100$ h / preamar. ♦ - frente estuarina.

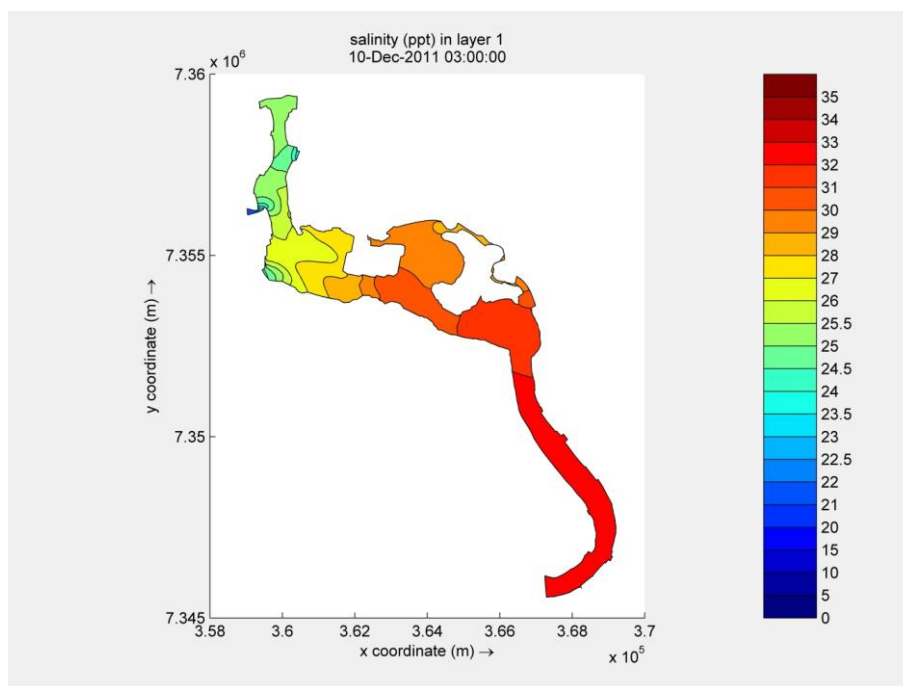


Figura 6.3.3-28. Distribuição superficial de salinidade para Caso 7 – pós-dragagem, vazão média de longo termo; maré de sizígia; $t=100$ h / preamar.

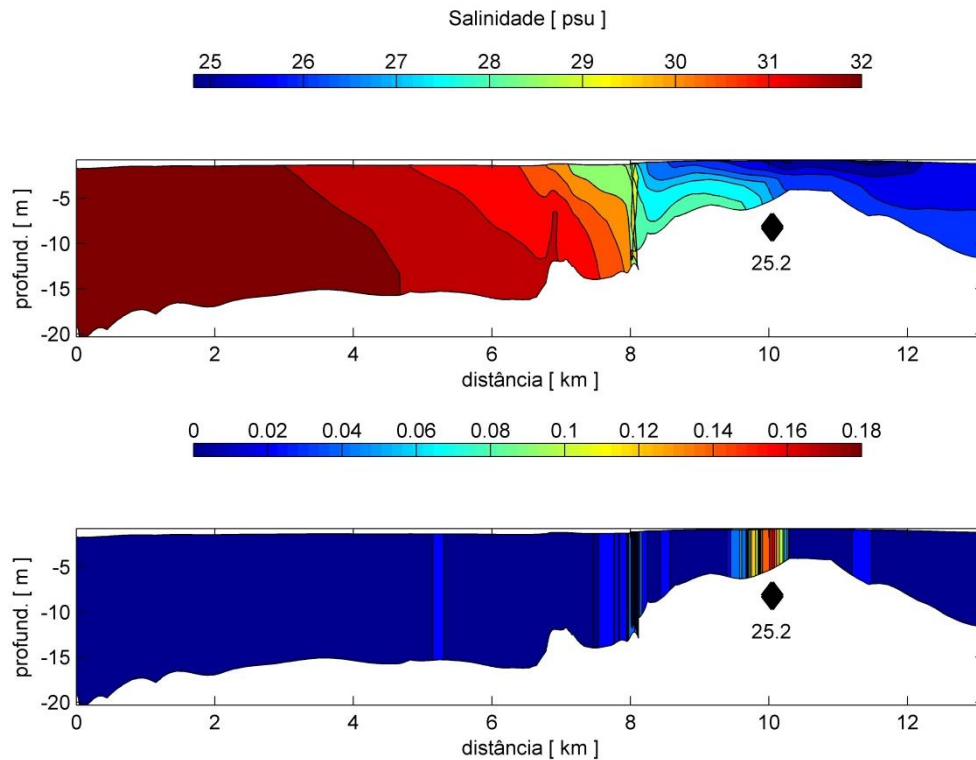


Figura 6.3.3-29. Perfis verticais de salinidade (painel superior) e de gradiente longitudinal de salinidade (m^{-1}) (painel inferior), desde a entrada do porto (0 km) até a baía de evolução no Canal de Piaçaguera (13 km). Caso 7 – pós-dragagem, vazão média de longo termo; maré de sizígia; $t=106$ h / baixamar. ♦ - frente estuarina.

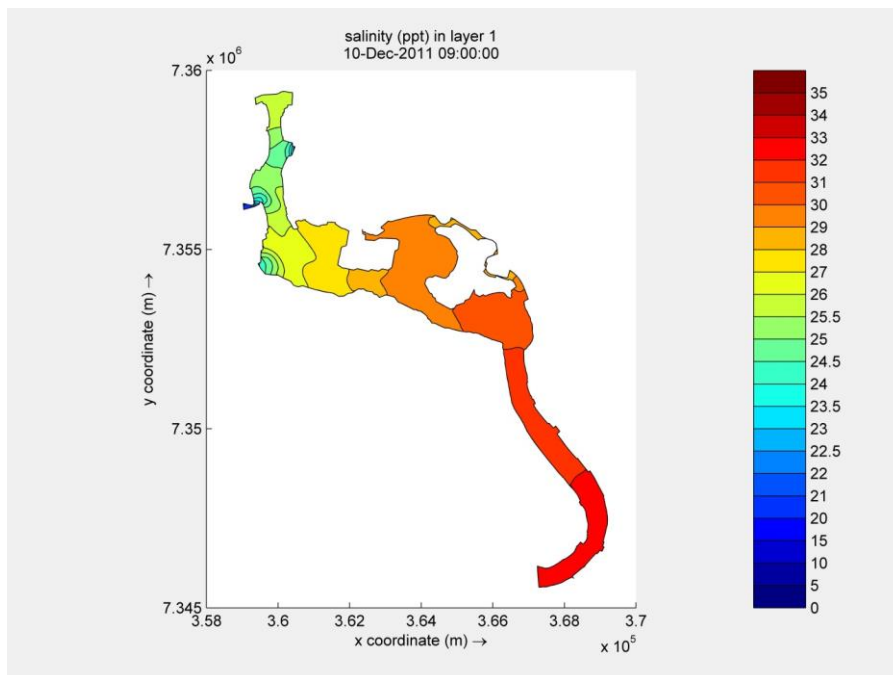


Figura 6.3.3-30. Distribuição superficial de salinidade para Caso 7 – pós-dragagem, vazão média de longo termo; maré de sizígia; $t=106$ h / baixamar.

Caso 4: Situação Pretérita, Vazão de Permanência para 10% e Maré de Sizígia

A sequência de figuras representativas dos resultados deste caso (Figuras 6.3.3-31 a 6.3.3-35) considera a simulação com valor de permanência de 10% e o período de maré de sizígia, quando os efeitos da maré são mais intensos, uma vez que a energia das correntes e as variações do nível do mar são maiores. Essa situação nos permite avaliar a maior influência da maré sobre a descarga estuarina.

O valor médio de penetração da frente (cunha) salina foi de 10,3 km, com valor médio de salinidade que a define igual a $S = 19,2$ (correspondente ao máximo gradiente).

A Figura 6.3.3-32 mostra o perfil vertical de salinidade desde a entrada do canal estuarino (Ponta da Praia) até o fim do Canal de Piaçaguera, enquanto a Figura 6.3.3-33 mostra a distribuição de salinidade na superfície do canal estuarino. O máximo gradiente, que define a frente estuarina, está indicado pelo valor correspondente de salinidade. As informações sobre as situações de preamar e de baixamar encontram-se nas legendas das figuras e nelas esperamos que haja, respectivamente, maior penetração e retração da frente salina no estuário, ainda que desprezível em algumas situações.

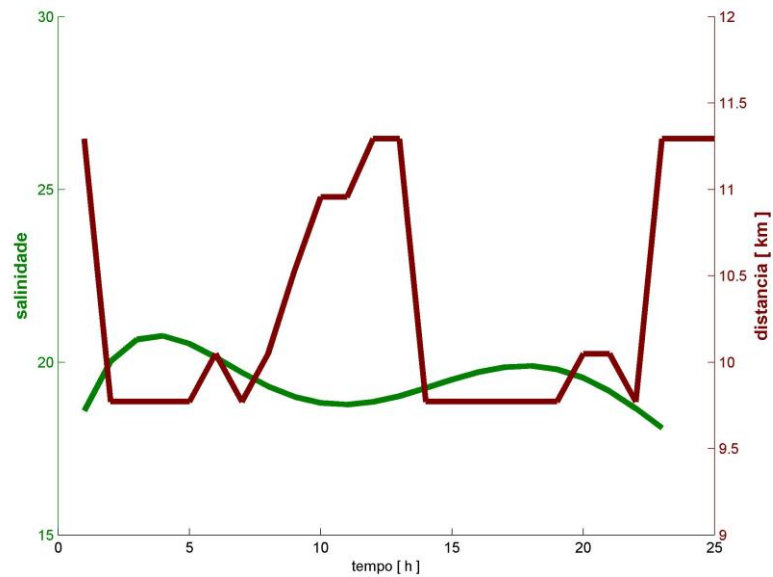


Figura 6.3.3-31. Evolução da excursão da maré no canal do Porto de Santos, durante 2 ciclos semidiurnos (25 horas), para o Caso 4 (situação pretérita). (—) salinidade na cunha salina (máximo gradiente); (—) excursão da maré (em metros) desde entrada do canal até a região de máximo gradiente de salinidade.

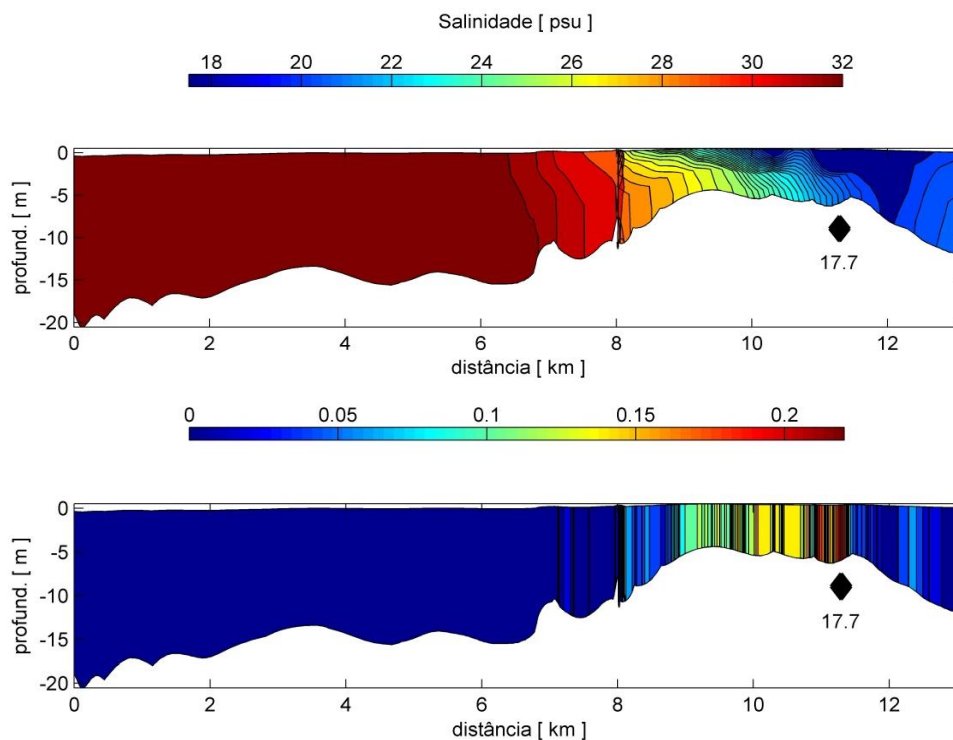


Figura 6.3.3-32. Perfis verticais de salinidade (painel superior) e de gradiente longitudinal de salinidade (m^{-1}) (painel inferior), desde a entrada do porto (0 km) até a bacia de evolução no Canal de Piaçaguera (13 km). Caso 4 – situação pretérita, vazão de permanência 10%; maré de sizígia; $t=100$ h / preamar. ♦ - frente estuarina.

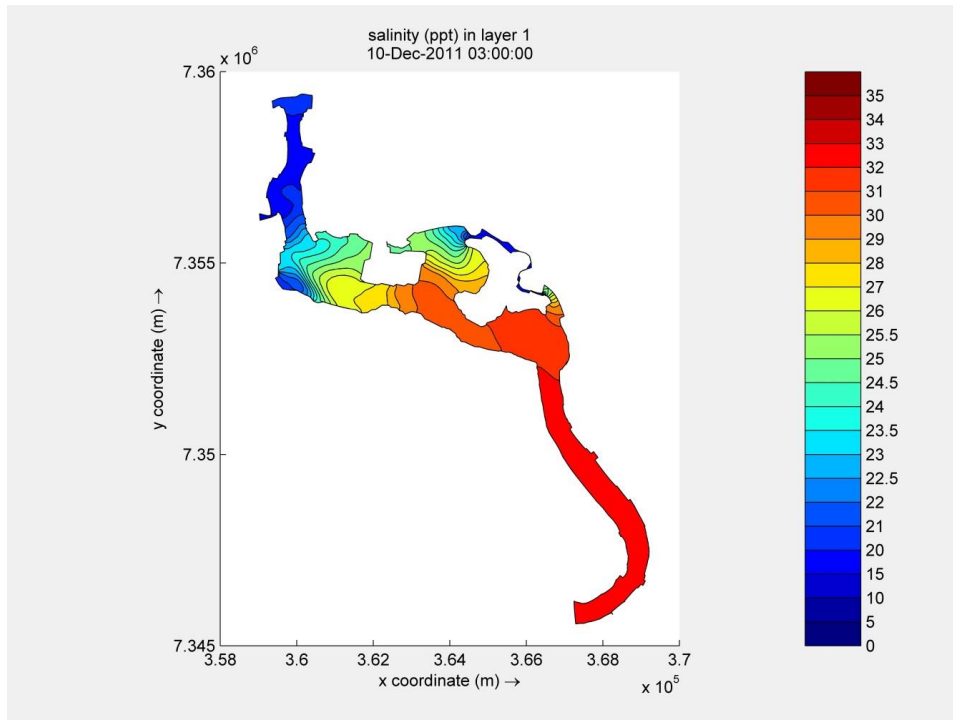


Figura 6.3.3-33. Distribuição superficial de salinidade para Caso 4 – situação pretérita, vazão de permanência 10%; maré de sizígia; t=100 h / preamar.

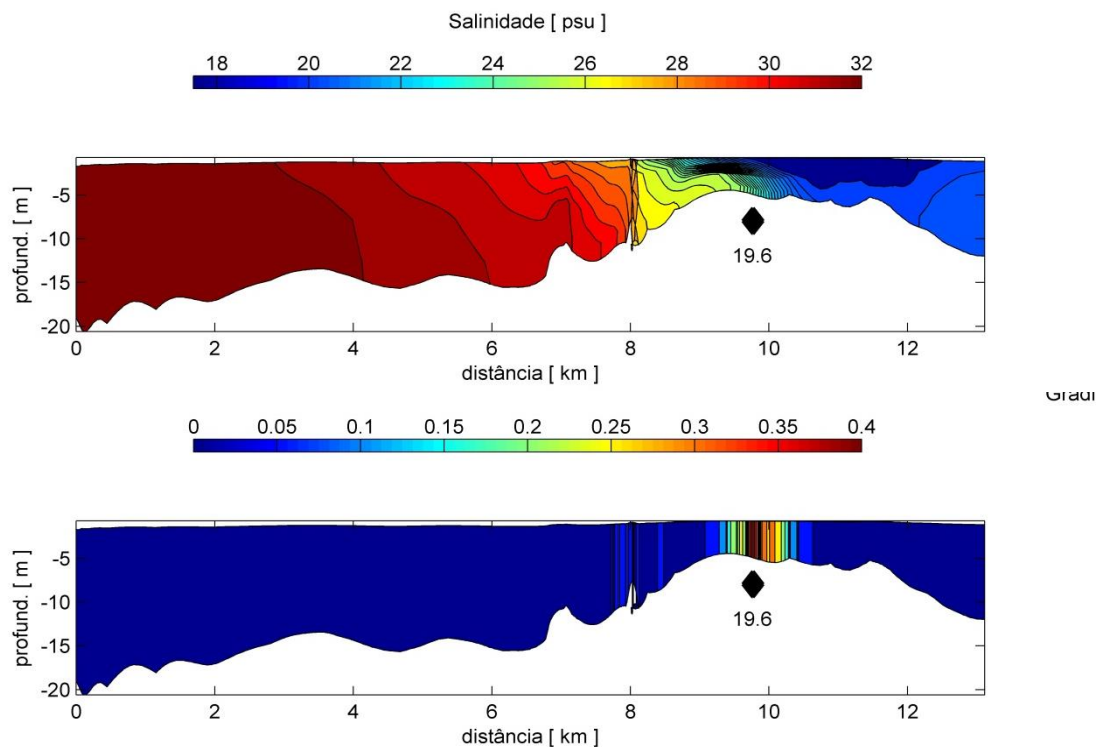


Figura 6.3.3-34. Perfis verticais de salinidade (painel superior) e de gradiente longitudinal de salinidade (m^{-1}) (painel inferior), desde a entrada do porto (0 km) até a bacia de evolução no Canal de Piaçaguera (13 km). Caso 4 – situação pretérita, vazão de permanência 10%; maré de sizígia; t=106 h / baixamar. ♦ - frente estuarina.

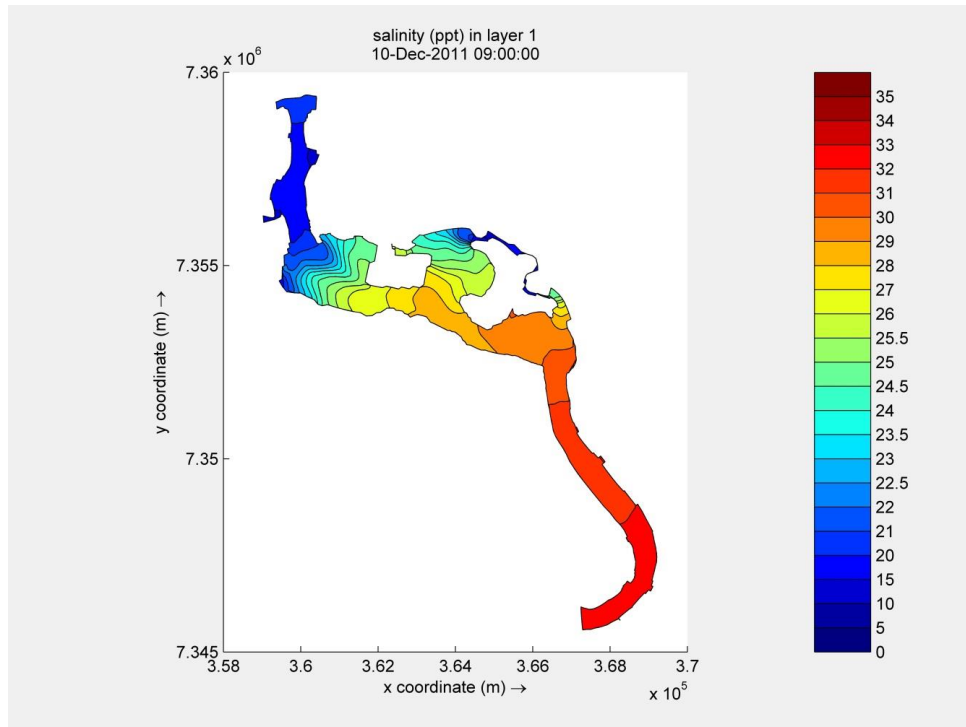


Figura 6.3.3-35. Distribuição superficial de salinidade para Caso 4 – situação pretérita, vazão de permanência 10%; maré de sizígia; $t=106$ h / baixamar.

Caso 8: Situação Pós-dragagem, Vazão de Permanência para 10% e Maré de Sizígia

A sequência de figuras representativas dos resultados deste caso (Figuras 6.3.3-36 a 6.3.3-40) considera a simulação com valor de vazão de permanência de 10% e o período de maré de sizígia, quando os efeitos da maré são mais intensos, uma vez que a energia das correntes e as variações do nível do mar são maiores. Essa situação nos permite avaliar a maior influência da maré sobre a descarga estuarina.

O valor médio de penetração da frente (cunha) salina foi de 9,8 km, com valor médio de salinidade que a define igual a $S = 22,5$ (correspondente ao máximo gradiente).

A Figura 6.3.3-37 mostra o perfil vertical de salinidade desde a entrada do canal estuarino (Ponta da Praia) até o fim do Canal de Piaçaguera, enquanto a Figura 6.3.3-38 mostra a distribuição de salinidade na superfície do canal estuarino. O máximo gradiente, que define a frente estuarina, está indicado pelo

valor correspondente de salinidade. As informações sobre as situações de preamar e de baixamar encontram-se nas legendas das figuras e nelas esperamos que haja, respectivamente, maior penetração e retração da frente salina no estuário, ainda que desprezível em algumas situações.

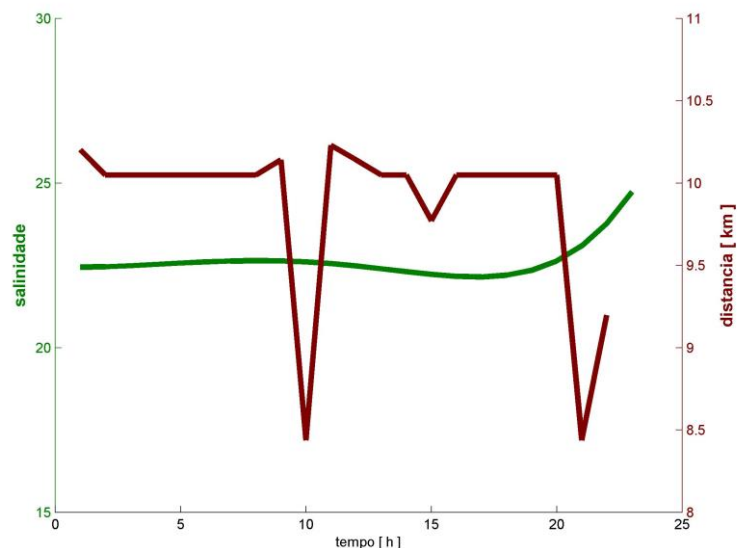


Figura 6.3.3-36. Evolução da excursão da maré no canal do Porto de Santos, durante 2 ciclos semidiurnos (25 horas), para o Caso 4 (situação pretérita). (—) salinidade na cunha salina (máximo gradiente); (—) excursão da maré (em metros) desde entrada do canal até a região de máximo gradiente de salinidade.

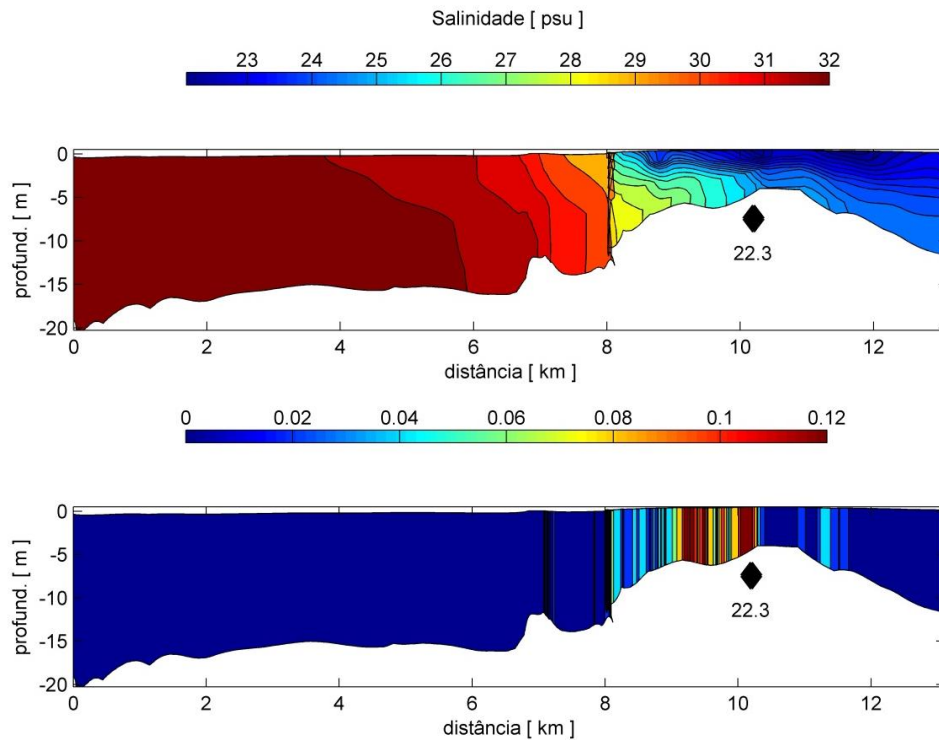


Figura 6.3.3-37. Perfis verticais de salinidade (painel superior) e de gradiente longitudinal de salinidade (m^{-1}) (painel inferior), desde a entrada do porto (0 km) até a bacia de evolução no Canal de Piaçaguera (13 km). Caso 8 – pós-dragagem, vazão de permanência 10%; maré de sizígia; $t=100$ h / preamar. ♦ - frente estuarina.

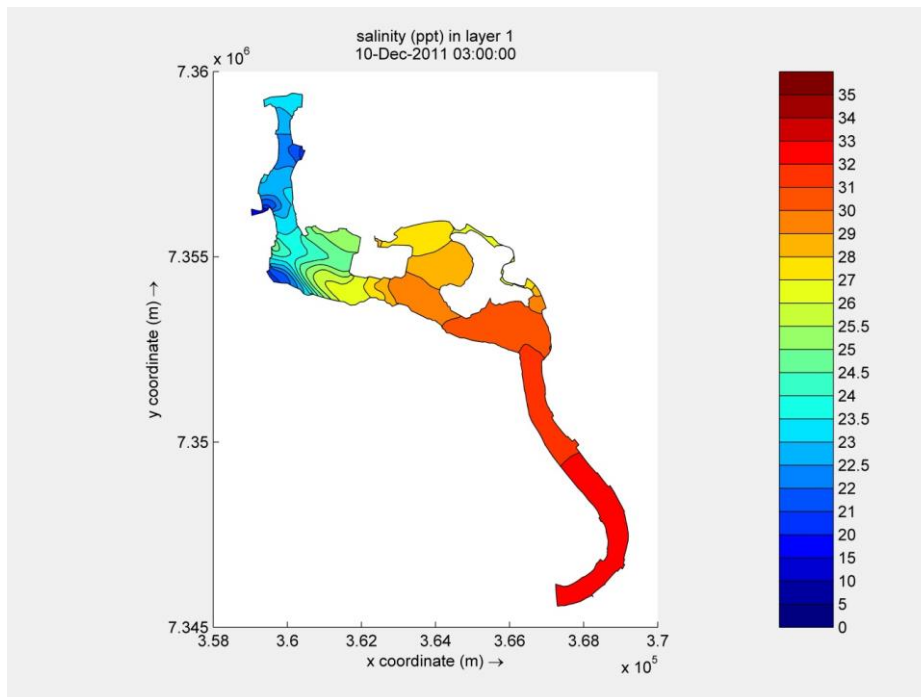


Figura 6.3.3-38. Distribuição superficial de salinidade para Caso 8 – pós-dragagem, vazão de permanência 10%; maré de sizígia; $t=100$ h / preamar.

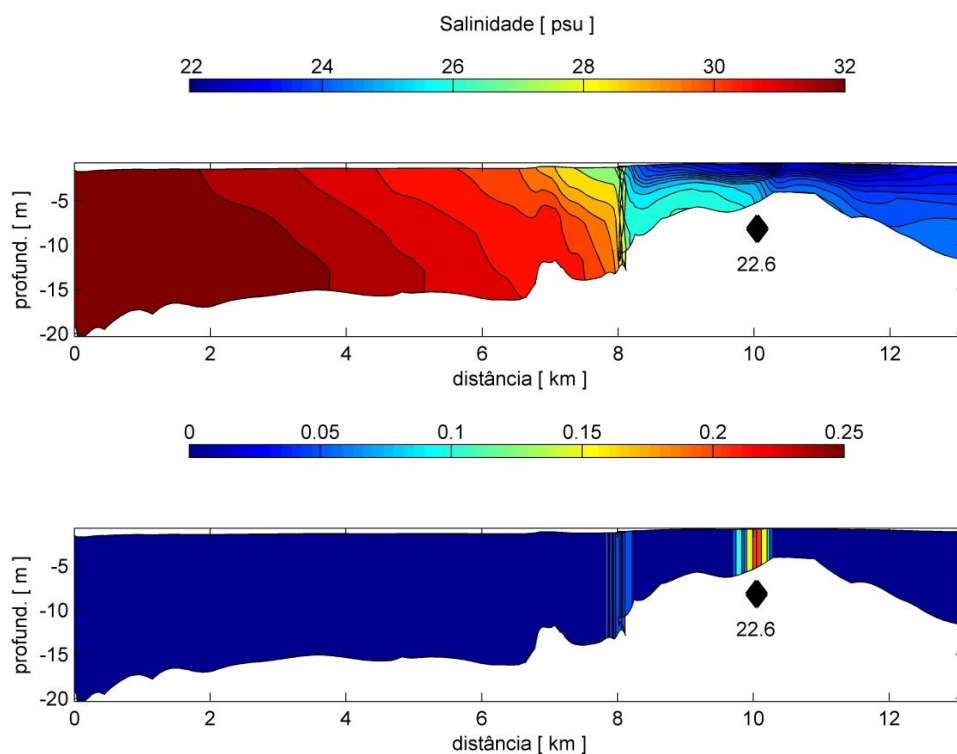


Figura 6.3.3-39. Perfis verticais de salinidade (painel superior) e de gradiente longitudinal de salinidade (m^{-1}) (painel inferior), desde a entrada do porto (0 km) até a bacia de evolução no Canal de Piaçaguera (13 km). Caso 8 – pós-dragagem, vazão de permanência 10%; maré de sizígia; $t=106$ h / baixamar. ♦ - frente estuarina.

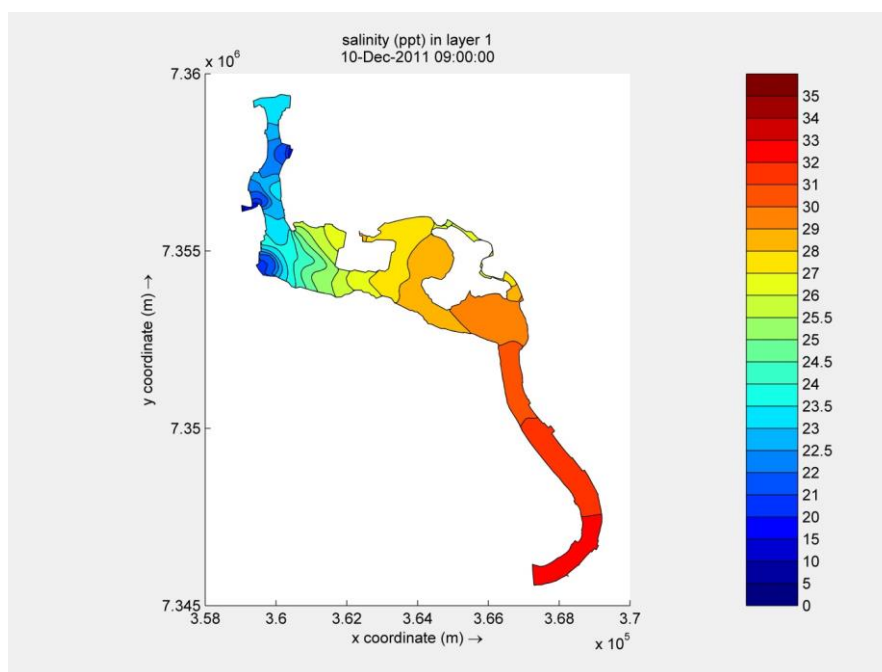


Figura 6.3.3-40. Distribuição superficial de salinidade para Caso 8 – pós-dragagem, vazão de permanência 10%; maré de sizígia; $t=106$ h / baixamar.

6.3.4. Transporte de Sedimentos no Estuário de Santos

A Tabela 6.3.4-1 mostra os valores de concentração de sólidos em suspensão, os quais foram medidos nas amostras de água coletadas na campanha de medições realizadas em 27 de fevereiro de 2013.

Tabela 6.3.4-1. Concentrações de sólidos em suspensão nas amostras de água de superfície (s) e fundo (f) coletadas nas Seções 4 a 11 (S4 a S11), no Estuário de Santos, medidas em 27 de fevereiro de 2013.

Seção	Hora	Profundidade de Coleta (m)	Sólidos Suspensos (mg/L)	Latitude	Longitude
S4f	09:05	21	39	-23°59,606'	46°18,345'
S4s	09:05	1	20	-23°59,606'	-46°18,345'
S5f	10:56	14	20	-23°57,667'	-46°17,667'
S5s	11:05	0.5	15	-23°58,146'	-46°17,837'
S5f	11:46	16	50	-23°57,192'	-46°18,535'
S6s	11:57	0.5	nd	-23°57,157'	-46°18,550'
S7f	12:20	6	35	-23°55,413'	-46°18,431'
S7s	12:29	0.4	22	-23°55,275'	-46°18,563'
S8s	13:06	0.5	nd	-23°55,404'	-46°19,993'
S8f	13:06	10	47	-23°55,404'	-46°19,993'
S9s	13:30	0.5	< 15	-23°55,454'	-46°20,037'
S9f	13:30	13	58	-23°55,454'	-46°20,037'
S10s	15:08	0.5	< 15	-23°54,050'	-46°22,534'
S10f	15:08	13	18	-23°54,050'	-46°22,534'
S11s	15:45	0.5	22	-23°53,317'	-46°22,563'
S11f	15:45	9	nd	-23°53,317'	-46°22,563'

As maiores concentrações de sedimento ocorreram próximo às entradas dos principais rios contribuintes do estuário (Rio Cubatão, Rio Quilombos, Rio Diana e passagem para o Canal de Bertiooga). Nessas imediações, os valores de concentração modelados foram próximos de 13 mg/L (Figuras 6.3.4-1 e 6.3.4-2), enquanto os valores medidos, nas seções mais próximas, foram da ordem de 40 a 50 mg/L (Tabela 6.3.4-1). O transporte de sedimentos total (Figura 6.3.4-3) mostra que essa propriedade é relativamente maior nas porções mais estreitas do estuário (ordem de $10^{-6} \text{ m}^3\text{s}^{-1}/\text{m}$) comparado às porções mais largas do estuário, onde a hidrodinâmica é menos efetiva no transporte de sedimentos

(ordem de $10^{-9} \text{ m}^3\text{s}^{-1}/\text{m}$). A diferença de ordens de grandeza (1000 vezes) é expressiva e corrobora a consideração feita sobre a eficiência do processo hidrodinâmico no transporte de sedimentos.

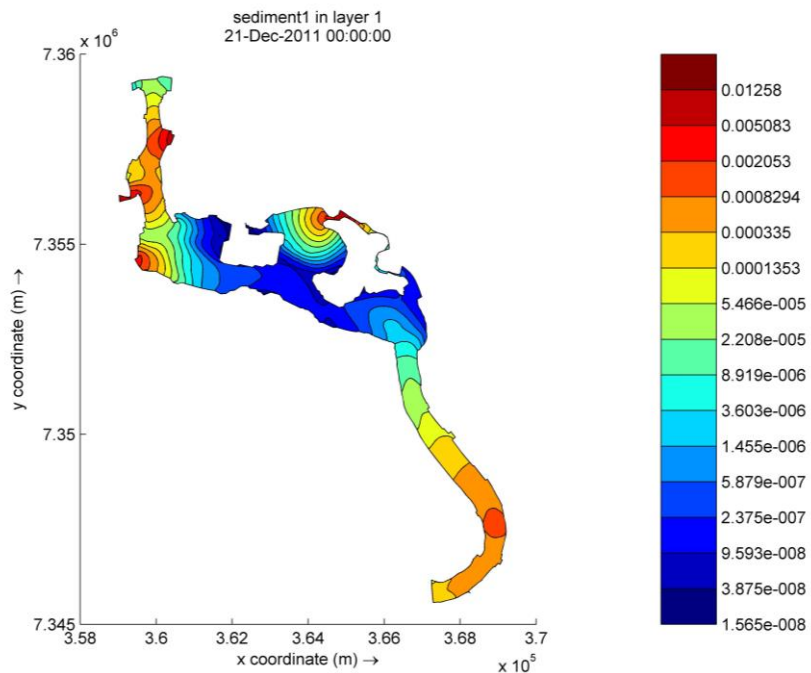


Figura 6.3.4-1. Concentração de sedimentos em suspensão superficiais (g/L), no estágio final da simulação para 30 dias.

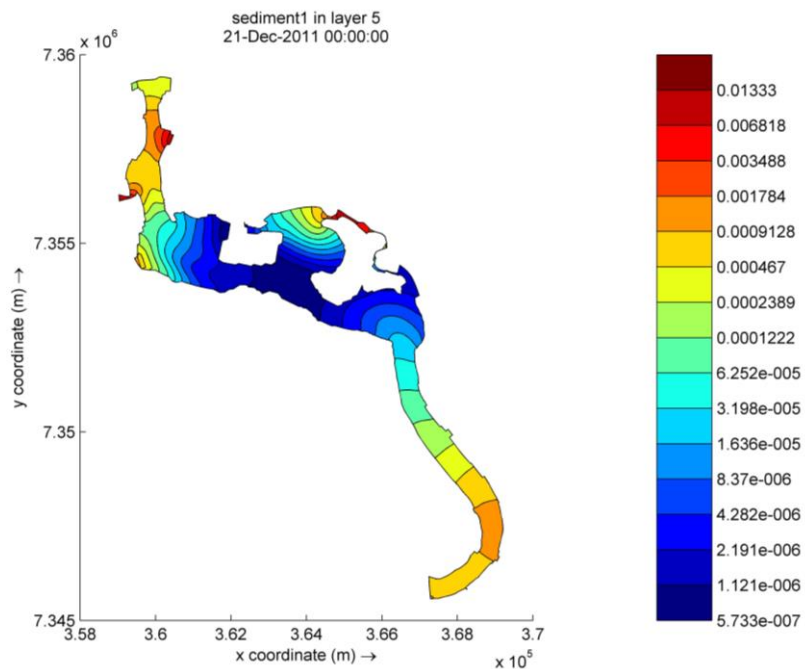


Figura 6.3.4-2. Concentração de sedimentos em suspensão próximo ao fundo (g/L), no estágio final da simulação para 30 dias.

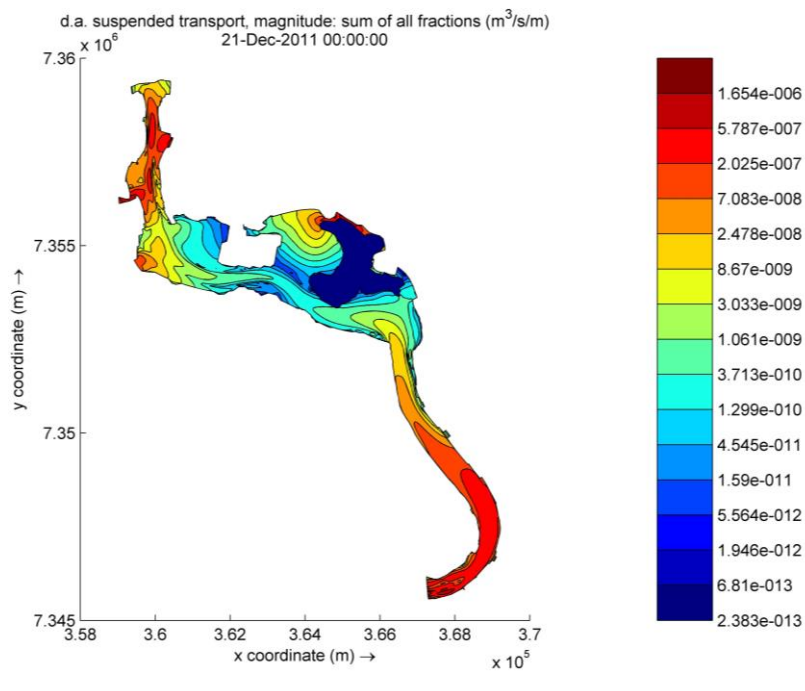


Figura 6.3.4-3. Transporte de sedimentos em suspensão total (coesivos e não coesivos) (m³ s⁻¹ /m), no estágio final da simulação para 30 dias.

Como já mencionado, para o desenvolvimento de um estudo de processos de sedimentologia marinha é necessário um conjunto observacional extenso e minucioso, com dados oceanográficos observados e modelados, estudos hidrológicos e geomorfodinâmicos. Apesar deste projeto não permitir maiores considerações sobre a sedimentologia marinha no Estuário de Santos, a avaliação da questão do transporte de sedimentos utilizando o modelo Delft3D-SED indica que o valor de transporte mais expressivo (ordem de 10⁻⁶ m³s⁻¹/m) ocorre na entrada do Canal do Porto e tem sentido estuário acima (Figura 6.3.4-4), sugerindo que o ambiente recebe uma quantidade mais expressiva de sedimentos oriundos da zona costeira e não dos tributários.

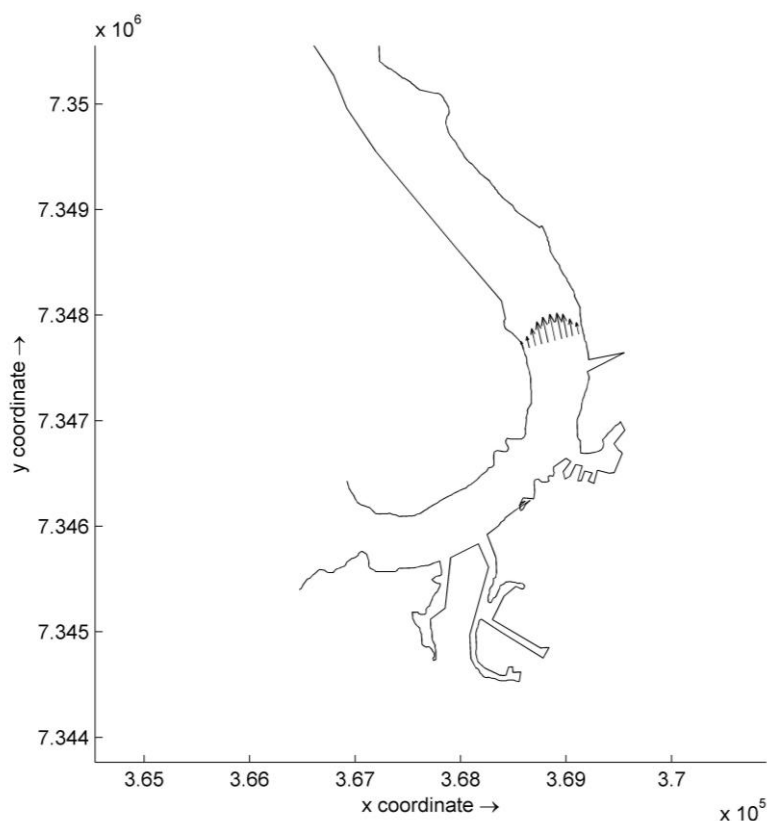


Figura 6.3.4-4. Representação vetorial do transporte de sedimentos em suspensão total (coesivos e não coesivos) integrada durante 30 dias de simulação. A ordem de grandeza dos vetores é de $10^{-6} \text{ m}^3\text{s}^{-1}/\text{s}$.

6.4. Considerações Finais

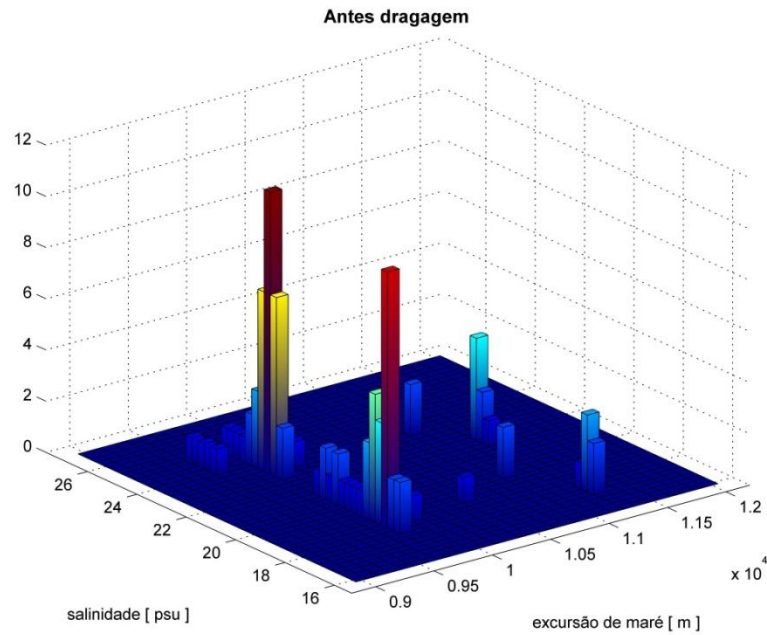
As distâncias de definição da frente salina estuarina no Canal do Porto de Santos apresentaram pequenas alterações entre os casos modelados. O valor médio dos Casos 1 a 4 (situação pretérita à dragagem) foi de 10,0 km e de 9,9 km para os Casos 5 a 8 (situação pós-dragagem), sendo aparentemente contrário ao esperado. Porém, como essa diferença é de apenas 1%, pode-se concluir que não houve alteração no posicionamento da frente salina após a dragagem de aprofundamento. Houve, no entanto, uma variação perceptível no valor de salinidade, ainda que relativamente pequena. O valor médio de salinidade associado à frente salina foi $S = 21,12$, antes da dragagem e de $S = 23,40$ após a dragagem de aprofundamento. Essa diferença representa aumento de 9,7% no valor da salinidade de definição da frente estuarina (cunha salina).

Outra avaliação relevante é obtida através da análise da salinidade integrada em todo canal estuarino ao longo do *talweg* (região mais profunda do canal de navegação), e durante todo o período modelado (15 dias). Foi possível concluir que, antes da dragagem, a salinidade média foi de $S = 29,2$, passando para $S = 30,3$, após a dragagem. O aumento de salinidade no estuário por decorrência da dragagem foi de 3,6 %.

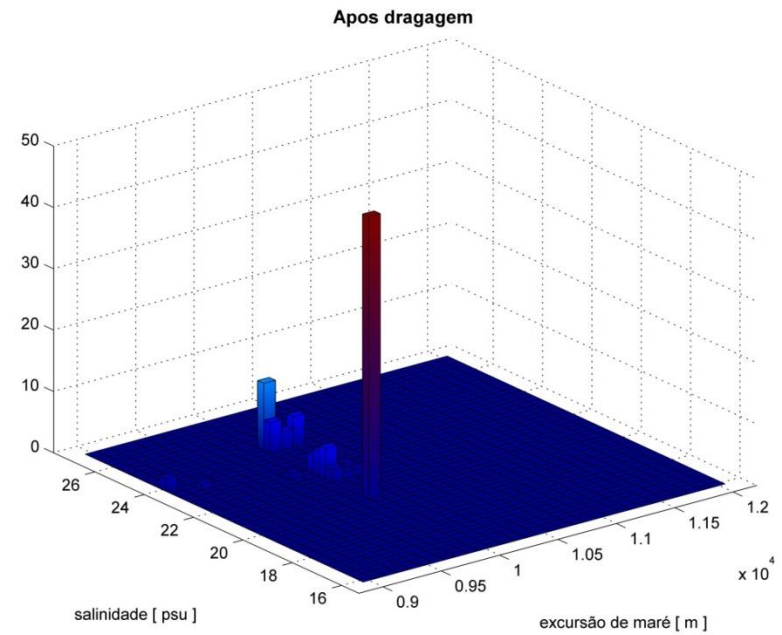
O histograma bivariado da distribuição das excursões de maré (penetração da cunha salina, Figura 6.4-1) mostra as distribuições de salinidade de máximo gradiente, que definem a frente salina em função de seu posicionamento. As ocorrências eram mais distribuídas antes da dragagem de aprofundamento, tornando-se mais concentradas após a dragagem. Tal fato pode ser explicado pelo aumento da salinidade no estuário após a dragagem. Conseqüentemente, o componente baroclínico da força de gradiente de pressão deve aumentar, causando o agrupamento das ocorrências. O componente baroclínico é um dos fatores que influenciam a dinâmica do estuário, porém em ordem inferior quando comparado ao componente barotrópico associado às marés e às descargas fluviais.

Atenciosamente,

Prof. Dr. Luiz Roberto Tommasi
Diretor Presidente - FUNDESPA



A



B

Figura 6.5-1. Histograma bivariado das excursões de maré no canal do Porto de Santos. *Painel A*: ocorrências antes da dragagem. *Painel B*: após a dragagem. Ambas as situações consideram as marés de sizígia e de quadratura, combinados às vazões de longo termo e de permanência de 10%.

6.5. Referências

- Cruz, J.C. & Tucci, C.E.M. 2008 Estimativa da disponibilidade hídrica através da curva de permanência. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 17(1): 111–124.
- DAEE, Departamento de Águas e Energia Elétrica 1997. Banco de dados fluviométricos do Estado de São Paulo. Secretaria de recursos hídricos saneamento e obras, convênio DAEE-USP. CD-ROM.
- Eichler, P.P.B.; Eichler, B.B.; Miranda, L.B. & Rodrigues, A.R. 2007. Modern foraminiferal facies in a subtropical estuarine channel, Bertioga, São Paulo, Brazil. *Journal of Foraminiferal Research*, 37(3): 234–247.
- Fundespa, Fundação de Estudos e Pesquisas Aquáticas 2011a. Terceiro Relatório Técnico Semestral do Programa de Monitoramento da Qualidade dos Sedimentos nas Áreas Dragadas: Sedimentologia, Geoquímica e Ecotoxicologia (Programa 10 e 11). Relatório Técnico, RTS-091211 Revisão 1. Fundespa, São Paulo, 91 p.
- FRF, Fundação Ricardo Franco 2008. Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA): projeto de aprofundamento do canal de navegação do Porto de Santos, Santos, SP. São Paulo, 2008.
- Harari, J. & Camargo, R 1995. Tides and mean sea level variabilities in Santos (SP), 1944 to 1989. Relatório Interno do Instituto Oceanográfico da USP, 36:15 p.
- Harari, J.; França, C.A.S. & Camargo, R. 2008. Perspectives on integrated coastal zone management in south america. In: 1^a. ed. Lisboa: IST Press, 2008. cap. Climatology and Hydrography of Santos Estuary, p. 147–160.
- Miranda, L.B.; Castro, B.M.; Kjerfve, B. 2004. Princípios de Oceanografia Física de Estuários. [S.l.]: Edusp, São Paulo.
- Miranda, L.B.; Castro, B.M.; Kjerfve, B. 1998. Circulation and mixing due to tidal forcing in the Bertioga Channel, São Paulo, Brazil. *Estuaries* (21): 204–214.
- Willmott, C. J. 1981. On the validation Models. *Physical Geography* (2): 184-194.