	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	1



## 1 MODELAGENS DA HIDRODINÂMICA, DE ONDAS, DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E DAS DRAGAGENS

Este capítulo apresenta a modelagem matemática ambiental da circulação hidrodinâmica, do comportamento geral das ondas, da evolução morfológica do fundo (transporte de sedimentos), e das dragagens de aprofundamento para implantação das estruturas de ampliação do Porto de Paranaguá. São considerados cenários de diagnóstico e de prognóstico de forma a dar base para a identificação de possíveis impactos ambientais decorrentes dessa ampliação. Na análise prognóstica serão apresentadas considerações em relação aos possíveis impactos das dragagens que deverão ocorrer em função da implantação de cada uma das estruturas de ampliação previstas.

A estimativa de perturbações na hidrodinâmica em corpos hídricos provocadas por mudanças na morfologia do fundo requer o conhecimento de características da circulação observada em toda a área de interesse e da geometria de fundo em sua forma atual. Também é necessário o conhecimento das forçantes que regem o comportamento das correntes e as possíveis modificações da geometria do fundo.

Nesse prognóstico são avaliadas situações típicas de inverno e verão com duração de um ciclo de maré (nesse estudo consideram-se períodos de 29,25 dias). Assim, podem ser colocados como objetivos deste estudo o que se segue:

- Modelar a atual circulação hidrodinâmica da baía de Paranaguá, o que dará o subsídio necessário para avaliar a evolução morfológica do fundo;
- Modelar o atual transporte de sedimentos através da evolução morfológica do fundo, o que permite estimar as ordens de grandeza dos processos de erosão e deposição na área de interesse;
- Modelar a circulação hidrodinâmica da baía de Paranaguá considerando a implantação, separadamente e de forma cumulativa, das estruturas de ampliação previstas;
- Estimar o transporte de sedimentos e/ou evolução morfológica do fundo (erosão/deposição) considerando a implantação de cada uma das estruturas de ampliação;
- Analisar o comportamento das ondas geradas pelo vento e possíveis alterações causadas pela implantação das estruturas de ampliação;

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	2

- Simular a dispersão de sedimentos durante a realização das dragagens de aprofundamento previstas para a implantação de cada uma das estruturas de ampliação.

O modelo utilizado nas simulações é o SisBaHiA<sup>®</sup> (**Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental**). A justificativa de escolha desse modelo bem como uma descrição dos módulos utilizados, forma e dados para implementação, definição dos cenários de simulação e respectivos resultados são apresentados a seguir.



### 1.1 Justificativa da escolha do SisBaHiA<sup>®</sup>

O sistema de modelos SisBaHiA<sup>®</sup> - **Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental**, está constante em desenvolvimento pela COPPE/UFRJ desde 1987. O SisBaHiA<sup>®</sup> encontra-se continuamente sendo ampliado e aperfeiçoado através de várias teses de mestrado e doutorado, além de projetos de pesquisa. O sistema já foi adotado em mais de cem estudos e projetos envolvendo modelagem de corpos de água naturais e artificiais, dentre eles reservatórios, rios, estuários e baías. Ele vem sendo amplamente usado no Brasil para simular hidrodinâmica, transporte de sedimentos – incluindo processos de erosão e deposição, e em suspensão – tanto em pesquisa quanto em projetos; exemplos são aplicações em locais como a Baía de Sepetiba e Baía de Guanabara (RJ), além de aplicações anteriores para a baía de Paranaguá.

O SisBaHiA<sup>®</sup> é um sistema profissional de modelos computacionais registrado pela Fundação COPPETEC, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa do COPPE/UFRJ - Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Ele é capaz de realizar modelagem ambiental de corpos de água e é constituído por um conjunto de modelos, dentre os quais estão o modelo de circulação hidrodinâmica bidimensional, o modelo de transporte de sedimentos ou evolução morfológica de fundo, de geração de ondas pelo vento, e lagrangeano de transporte advectivo-difusivo – estes serão os módulos utilizados no desenvolvimento desse estudo.

Neste estudo, todas as simulações foram realizadas utilizando as versões 2DH dos modelos, ou seja, foram consideradas variações nas duas direções horizontais, mantendo-se valores constantes na vertical. A modelagem bidimensional permite observar variações espaciais nos resultados, o que, ao mesmo tempo em que torna a resolução do problema menos complexa quando comparada a modelos tridimensionais, também fornece resultados de melhor qualidade nas situações aqui consideradas.





 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	3

Em termos hidrodinâmicos, a modelagem bidimensional também considera o formato do corpo d'água, a ocorrência de curvas e de regiões de estagnação. A desvantagem do uso de modelos 2DH é que estes não consideram variações na vertical, não podendo, por exemplo, simular gradientes verticais. Entende-se, no entanto, que a utilização do modelo bidimensional do SisBaHia<sup>®</sup>, que considera valores médios na vertical, não gera erros significativos nos resultados das simulações realizadas nesse estudo. Em regiões onde as profundidades são relativamente pequenas e os padrões de estratificação fracos, a velocidade das correntes e o transporte podem ser bem representados por meio de variáveis médias na vertical. Nestes casos as equações governantes são promediadas na dimensão vertical reduzindo a dimensão do problema. Neste tipo de aplicação, o campo de velocidades deve ser conhecido, ou seja, o transporte de um escalar não altera a hidrodinâmica do corpo de água. Como consequência, a modelagem do padrão hidrodinâmico do corpo de água e a modelagem do transporte do escalar podem ser problemas desacoplados. O transporte de uma dada substância em um corpo de água é dominado pela advecção, sugerindo uma dependência entre a simulação hidrodinâmica e o processo de transporte. Sendo assim, a simulação do padrão de circulação hidrodinâmico é essencial na estrutura computacional quando da modelagem de transporte de sedimentos.

Com base nos textos da referência técnica e no manual, na seção 1.2 é apresentada a descrição dos módulos utilizados no desenvolvimento deste estudo; maiores informações sobre o SisBaHia<sup>®</sup> podem ser encontradas em <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>.

É importante, ainda, mencionar que a modelagem matemática não é uma ciência exata. Existem simplificações na definição dos processos dominantes para a modelagem, como imprecisões em função da discretização da região de estudo e incertezas nas condições de contorno. As imprecisões podem ser reduzidas através da calibração do modelo, processo para o qual são necessários dados medidos após a implantação dos empreendimentos, e ainda através da utilização de métodos de elevada ordem e altas resoluções. Os resultados, mesmo em casos sem calibração (no caso dos prognósticos), permitem análises de processos dominantes e de ordens de grandeza das variáveis calculadas. Portanto, valores provenientes de simulações matemáticas devem ser contextualizados como aproximados e preliminares, e servir como suporte técnico para a gestão ambiental e tomada de decisões.

## 1.2 O modelo SisBaHia<sup>®</sup>

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	4

Uma descrição dos modelos hidrodinâmico, de evolução morfológica (transporte de sedimentos) e de geração de ondas é apresentada na sequência. Toda a descrição tem como base os textos da referência técnica e do manual do modelo disponíveis em <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>.



### 1.2.1 Modelo de Circulação Hidrodinâmica

O modelo de circulação hidrodinâmica 2DH (bidimensional) do SisBaHiA® considera forçantes barotrópicos, e foi desenvolvido para corpos de água nos quais efeitos de densidade variável possam ser desprezados, sendo capaz de desenvolver uma ótima representação de escoamentos em domínios naturais com geometria complexa. Processos de calibração são minimizados devido ao fato da discretização espacial via elementos finitos quadráticos permitir um bom mapeamento de corpos de água, e ótima representação de contornos recortados e batimetrias complexas – usuais em corpos de água.

No desenvolvimento de um sistema neste contexto, uma série de atributos de modelagem deve ser incorporada aos modelos à medida que estes são continuamente desenvolvidos. Isso inclui características necessárias à modelagem adequada de diversos corpos de água naturais, facilidades para exibição dos resultados, características que aumentem a confiabilidade e aceitação dos modelos, e que permitam que estes sejam aperfeiçoados e adaptados para estudos futuros, ou otimizados para estudos específicos. Os seguintes atributos podem ser considerados no continuado desenvolvimento do SisBaHiA®:

A estratégia de discretização espacial é otimizada para corpos de água naturais, pois permite excepcional detalhamento de contornos recortados e batimetrias complexas. A discretização espacial é preferencialmente feita via elementos finitos quadrangulares biquadráticos, mas pode igualmente ser feita via elementos finitos triangulares quadráticos ou combinação de ambos. Tal método de discretização espacial é potencialmente de quarta ordem.

Tensões e difusividades turbulentas são modeladas de uma maneira que torne a calibragem dos modelos diretamente relacionada a variáveis naturais. O emprego de esquemas auto-ajustáveis para a turbulência em escala sub-malha minimiza a necessidade de calibragem. A modelagem da turbulência é baseada em técnicas de filtragem que levam à simulação de grandes vórtices, ou vórtices resolvíveis. Tal técnica é conhecida na literatura internacional como *LES*, sigla de *Large Eddy Simulation*.

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	5

O modelo hidrodinâmico admite especificação pontual do tipo de material de fundo, e usa interpolação biquadrática para valores de profundidade e rugosidade equivalente do fundo, permitindo ótima acurácia na representação física do leito. Além disso, permite que o atrito no fundo seja variável no tempo e no espaço. Tal realismo é extremamente relevante para simulações de escoamentos em rios e reservatórios.

O modelo de circulação hidrodinâmica 2DH (bidimensional) do SisBaHiA<sup>®</sup> calcula campos de velocidades promediadas na vertical, 2DH, sendo usado se o interesse estiver voltado para regiões nas quais as acelerações advectivas ao longo da coluna de água sejam pouco relevantes.

Várias opções para resultados de formato gráfico estão incluídas no SisBaHiA<sup>®</sup>. Entretanto, o resultado dos modelos pode ser exportado e usado em qualquer programa gráfico. Os modelos são baseados em esquemas numéricos bem estabelecidos, para garantia de validade e aceitação. A seguir descrevem-se em detalhes aspectos relativos ao módulo promediado na vertical (2DH) do modelo hidrodinâmico do SisBaHiA<sup>®</sup>.

Para cada intervalo de tempo, o módulo 2DH determina as componentes das velocidades médias na vertical, na direção  $x$  e  $y$ ,  $U(x, y, t)$  e  $V(x, y, t)$ , respectivamente, e as elevações da superfície livre,  $z = \zeta(x, y, t)$ . As componentes da velocidade resolvível, média na vertical, podem ser definidas como:



$$U(x, y, t) = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} u(x, y, z, t) dz \quad , \quad V(x, y, t) = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} v(x, y, z, t) dz$$

Considerando esta definição e supondo uma batimetria permanente durante o período de simulação, i.e.,  $z = -h(x, y)$ , a equação da continuidade, ou imposição da condição de escoamento incompressível pode ser reescrita para um escoamento 2DH integrado ao longo da vertical, como segue:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz = \underbrace{q_P - q_E \pm q_I}_{\Sigma q} \quad \therefore \quad \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \Sigma q$$

Vale lembrar que os termos que compõem  $\Sigma q$  podem resultar diretamente de condições de contorno apropriadas na superfície livre e no fundo.

- Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção  $x$ :

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	6

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o H} \left( \frac{\partial(H\bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_x^S - \tau_x^B) + 2\Phi \sin \theta V - \frac{U}{H} \Sigma q$$

- Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção y:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o H} \left( \frac{\partial(H\bar{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_y^S - \tau_y^B) - 2\Phi \sin \theta U - \frac{V}{H} \Sigma q$$



Nas duas equações anteriores,  $\tau_i^S$  e  $\tau_i^B$  são as tensões de atrito na superfície livre e no fundo, respectivamente. Essas tensões surgem das condições de contorno dinâmicas na superfície livre e no fundo, quando os termos relativos às tensões nas equações, são integrados ao longo da vertical.  $\rho_o$  é uma densidade constante de referência e  $\Phi$  é a velocidade angular de rotação da Terra no sistema de coordenadas local. Os termos com  $\Phi$  são as forças de Coriolis, no qual  $\theta$  é o ângulo de Latitude. As acelerações de Coriolis apresentadas nessas equações consideram apenas o efeito devido às componentes horizontais do campo de escoamento, já que a componente vertical do campo de velocidades é desprezível em escoamentos de grande escala em corpos de água relativamente rasos.

Como é usual em modelos de escoamento com superfície livre, o atrito na superfície livre devido ao vento também é escrito em termos de uma formulação de velocidade quadrática:

$\tau_i^S = \rho_{ar} C_D W_{10}^2 \cos \phi_i$  ;  $[i = 1,2]$  onde  $\rho_{ar}$  é a densidade do ar,  $C_D$  é o coeficiente de arraste do vento,  $W_{10}$  é o valor local da velocidade do vento medida a 10 metros acima da superfície livre, e  $\phi_i$  é o ângulo entre o vetor de velocidade do vento local e a direção  $x_i$ . O coeficiente de arraste do vento,  $C_D$ , pode ser determinado a partir de uma série de fórmulas empíricas. A fórmula adotada no SisBaHiA® é a apresentada por Wu em 1982:

$$C_D = (0.80 + 0.065W_{10}) \times 10^{-3} \quad ; [W_{10} \text{ em m.s}^{-1}].$$

A tensão de atrito no fundo é calculada através da seguinte expressão:  $\tau_i^B = \rho_o \beta U_i$   $[i = 1,2]$

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	7

$$\beta = \frac{g}{C_h^2} \sqrt{U^2 + V^2}$$

onde o parâmetro  $\beta$  é dado por  $\beta = \frac{g}{C_h^2} \sqrt{U^2 + V^2}$ , onde  $C_h$  é o coeficiente de Chézy, definido

como:  $C_h = 18 \log_{10} \left( \frac{12H}{2\varepsilon} \right) = 18 \log_{10} \left( \frac{6H}{\varepsilon} \right)$ , e  $2\varepsilon$  é a altura da rugosidade equivalente do fundo, sendo  $\varepsilon$  a amplitude.

Utilizando o modelo de turbulência baseado na técnica de filtragem para um escoamento promediado na vertical chega-se a:

$$\frac{\bar{\tau}_{ij}}{\rho_o} = \underbrace{\frac{\Lambda_k^2}{24} \left( \left| \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right| \left| \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \right| + \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \right)}_{\text{termos de filtragem}} + \underbrace{(D_H + D_V) \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)}_{\text{difusão turbulenta e dispersão horizontal de momentum}}$$

onde, como no caso anterior,  $i, j = 1, 2$  e  $k = 1, 2, 3$ , com  $k = 3$  correspondendo ao tempo  $t$  (neste contexto  $x_3 = t$ ). Os parâmetros  $\Lambda_k = \alpha_k \Delta x_k$  são escalas de largura de filtragem local na dimensão  $x_k$ , sendo  $\alpha_k$  constantes de calibração. O valor de  $\alpha_k$  calibra a quantidade de dissipação dada pelos termos de filtragem. Valores usuais para  $\alpha_k$  estão entre 0,25 e 2,0, e na maioria das vezes o valor 1,0 fornece bons resultados.  $D_H$  é o coeficiente de viscosidade turbulenta, promediado na vertical, no plano horizontal, e  $D_V$  é o coeficiente de dispersão horizontal da quantidade de movimento.

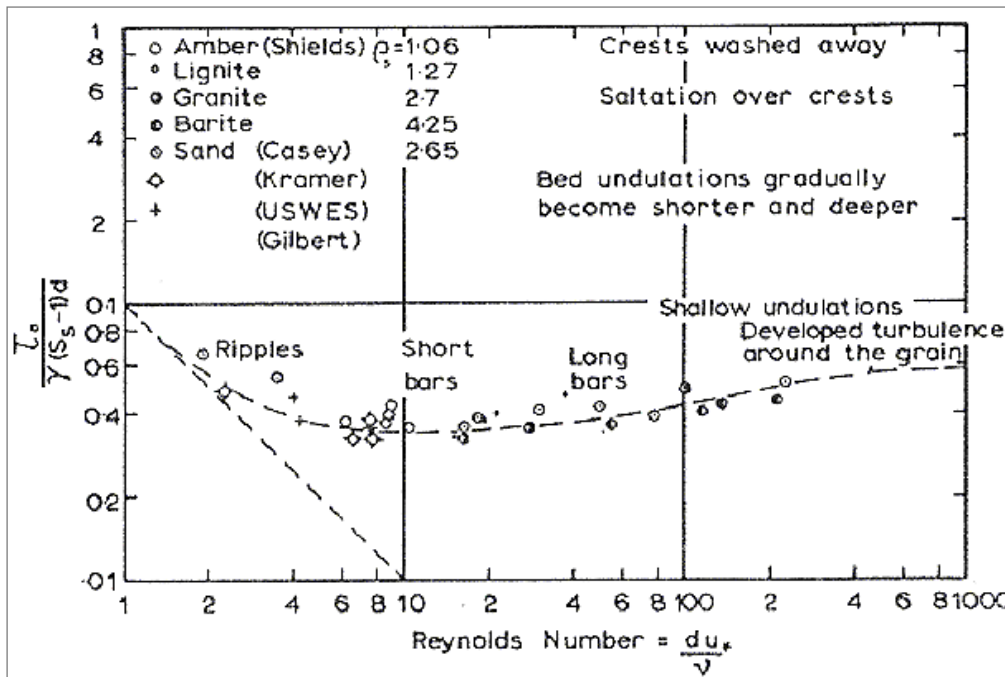
### 1.2.2 Modelo de Transporte de Sedimentos e Evolução Morfológica do Fundo

O modelo hidrodinâmico com fundo móvel faz o balanço de massa de sedimentos no fundo, calculando ao longo do tempo o transporte de sedimentos devido à ação dos agentes hidrodinâmicos. É possível determinar as alterações na superfície do fundo, ou seja, considerar o fundo móvel e assim, fazer uma avaliação da evolução. Considerando  $S_F$  a posição do fundo, teremos:  $S_F = z + h(x, y, t) = 0$ , onde  $h(x, y, t)$  é a posição do fundo. Alterando a batimetria, as demais características hidráulicas do trecho serão modificadas.

Para uma determinada granulometria de sedimentos, o processo de erosão e transporte, bem como de assoreamento, depende da *tensão crítica de mobilidade*,  $\tau_c$ . Valores da tensão de arrasto no leito,  $\tau_o$ , acima deste valor crítico podem promover a erosão e transporte de grãos enquanto que, para valores inferiores a esta tensão, os grãos permanecem imóveis, ou, se em movimento, tenderão a se depositar.

As tensões críticas de mobilidade para diferentes granulometrias de sedimentos não coesivos são obtidas através do diagrama de Shields apresentado na Figura 1. A curva no diagrama

representa o valor crítico do parâmetro de Shields,  $\Psi_c$ , a partir do qual se calcula a tensão crítica no fundo,  $\tau_c$ , para a qual o grão de sedimento passaria a ter mobilidade.



Fonte: Rosman, 2016

**Figura 1 - Diagrama de Shields tradicional.**

Para o caso de sedimentos predominantemente arenosos, é possível estabelecer um critério de mobilidade. Usualmente este critério baseia-se no parâmetro de Shields,  $\Psi$ :

$$\Psi = \frac{u_*^2}{g(S_s - 1)d} = \frac{\tau_o}{\gamma_a(S_s - 1)d} = f\left(\frac{du_*}{\nu}\right) \quad ; \quad S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_a}$$

onde  $\tau_o$  é a tensão de arrasto no leito,  $\gamma_s$  é o peso específico do grão,  $\gamma_a$  é o peso específico da água ( $g\rho_o$ ),  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\rho_o$  é a massa específica da água,  $d$  é o diâmetro do grão,  $u^*$  é a velocidade de atrito no leito e  $\nu$  é viscosidade cinemática da água. O termo entre parêntesis,  $R^*$ , é também conhecido como *Número de Reynolds* do grão; o Diagrama de Shields relaciona o parâmetro de Shields,  $\Psi$ , e o número de Reynolds do grão,  $R^*$ .

A aplicação do critério de transporte de sedimentos baseado no parâmetro de Shields consiste na comparação entre a tensão de arrasto no fundo,  $\tau_o$ , causada pelos agentes hidrodinâmicos, em um dado local e a tensão crítica para os sedimentos no mesmo local,  $\tau_c$ . Teoricamente, se  $\tau_o$  for maior que  $\tau_c$  admite-se que os sedimentos no local são mobilizados e transportados pelas correntes, caso contrário os sedimentos permanecem em repouso ou tendem a se depositar se estiverem sendo transportados.

Como o emprego do tradicional Diagrama de Shields acarreta em um processo iterativo, apresenta-se, na Figura 2, um diagrama modificado, no qual a tensão crítica pode ser obtida diretamente a partir da caracterização do sedimento e da água. A Figura 3 apresenta um gráfico exemplificando de valores de  $\tau_c$  calculados para água doce ( $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$ ) com sedimentos com diâmetros em unidades  $\phi$ .

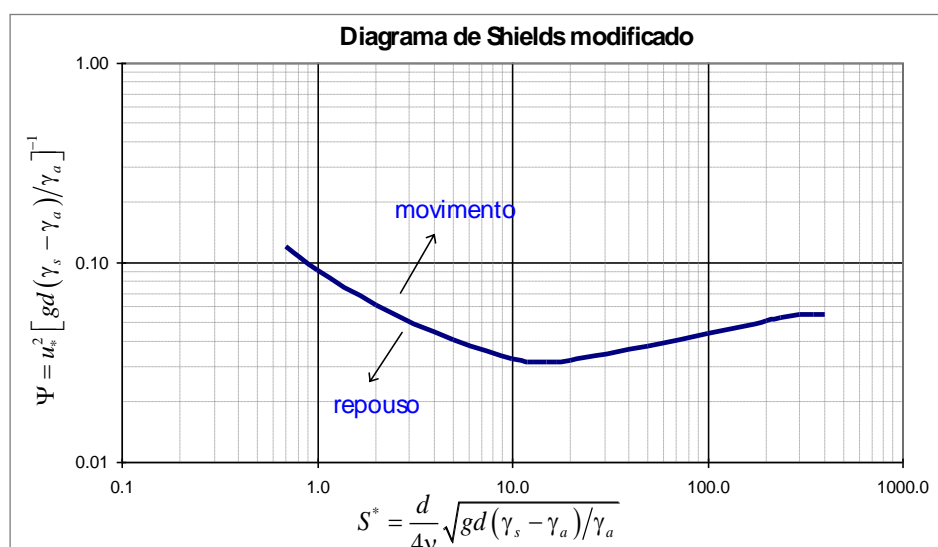
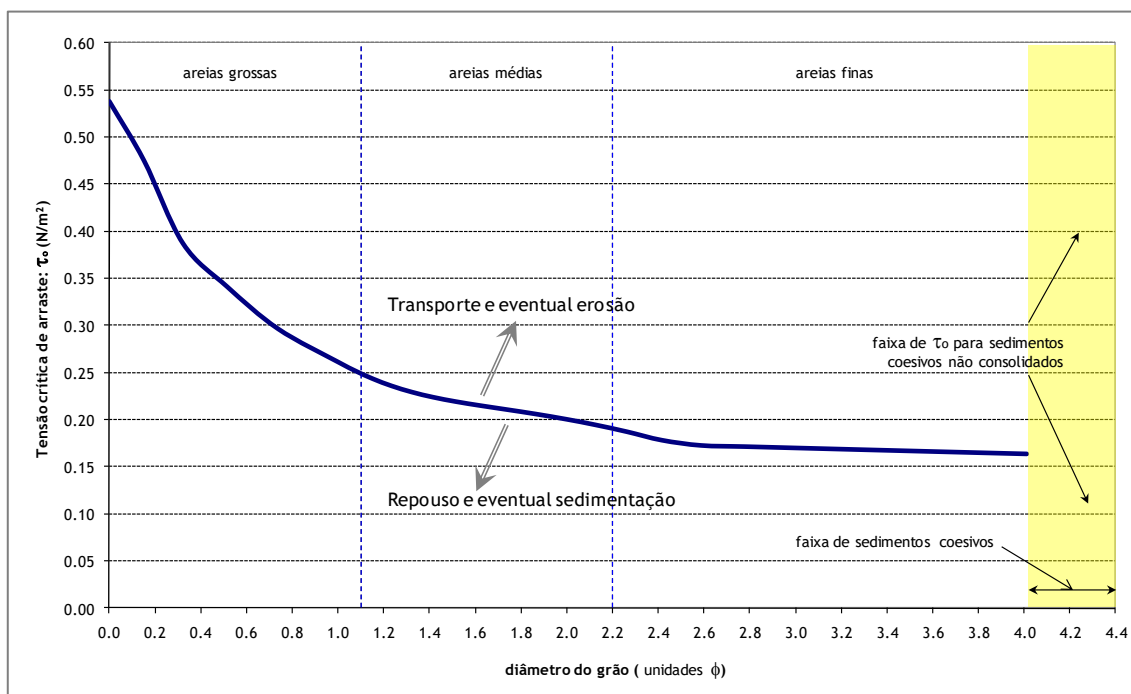




Figura 2 - Diagrama de Shields modificado, no qual a tensão crítica  $\tau_c = (u_*^2/\rho_0)$ , pode ser obtida diretamente das características do sedimento e da água.





 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:  10
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	

**Figura 3 - Tensão crítica para mobilidade,  $\tau_c$ , calculada pelo diagrama de Shields modificado. No caso considerou-se água salgada com  $\rho_o = 1025 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu = 1.19\text{E}-6 \text{ m}^2/\text{s}$  e sedimentos com massa específica  $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ . Unidades  $\phi = -\ln(d [\text{mm}])/\ln(2)$ .**

Como dito anteriormente, o método mais usado para verificar a ocorrência de transporte de sedimentos, ou transporte sólido, é baseado na diferença entre a tensão exercida no fundo pelo escoamento,  $\tau_o$ , e a tensão crítica de mobilidade do sedimento,  $\tau_c$ . As tensões críticas de mobilidade para diferentes granulometrias de sedimentos não coesivos são obtidas através do diagrama de Shields apresentado na Figura 2. A curva no diagrama representa o valor crítico do parâmetro de Shields,  $\Psi_c$ , a partir do qual se calcula a tensão crítica no fundo,  $\tau_c$ , para a qual o grão de sedimento passaria a ter mobilidade.

Na natureza o limite para o movimento incipiente não é bem definido, pois os sedimentos apresentam diversas irregularidades de forma e tamanho. Assim, deve-se interpretar o valor de  $\Psi_c$  como um valor de probabilidade 50% de ocorrer movimento ou não, havendo uma faixa de incerteza com tolerância  $\alpha$ . De fato, como se observa na Figura 1, há uma nuvem de pontos no entorno da linha pontilhada que define  $\Psi_c$ . Deste modo, ao invés de um valor crítico preciso, há uma faixa de movimento incipiente definida por  $\Psi_c \pm \alpha$ .

Para incorporar este efeito probabilístico, define-se um fator de tolerância  $\alpha$  de modo que, para um dado tamanho de grão em um dado tempo:

- Se a tensão no fundo exercida pelo escoamento,  $\tau_o$ , for tal que  $\Psi/\Psi_c < (1 - \alpha)$ , o modelo considera que certamente não há condições de erosão ou transporte. No caso, se no local houver sedimentos em transporte, estes se depositariam, e os sedimentos em repouso assim permaneceriam.
- Contrariamente, se ocorrer  $\tau_o$  de modo que  $\Psi/\Psi_c > (1 + \alpha)$ , o modelo considera que certamente o escoamento tem capacidade de erosão e transporte.

Na situação intermediária o modelo entra no seguinte processo probabilístico:

- Se  $(\Psi/\Psi_c - 1 + \alpha) < (2\alpha \times A[0,1])$  admite-se não haver capacidade de erosão e transporte, caso contrário há capacidade. Na expressão, a função  $A[0,1]$  gera números aleatórios entre 0 e 1, a cada instante.
- Repare que se  $\Psi/\Psi_c = 1$  a probabilidade de erosão e transporte ou de sedimentação é de 50%. À medida que  $\Psi/\Psi_c$  se aproxima de  $(1 - \alpha)$  a

probabilidade de erosão e transporte diminui até 0, e à medida que  $\Psi/\Psi_c$  se aproxima de  $(1 + \alpha)$  a probabilidade aumenta até 1.

- Com um valor de  $\alpha$  diferente de zero simula-se a incerteza que existe na determinação de  $\Psi_c$  ou do equivalente  $\tau_c$ . Como  $\Psi_c$  é estimado através da curva do parâmetro de Shields, que é ajustada a valores experimentais, o valor de  $\alpha$  representa a amplitude da nuvem de dados experimentais.

Destaca-se que com a utilização do fator de tolerância  $\alpha$ , incorpora-se também um efeito de continuidade entre diferentes faixas granulométricas. Como um exemplo, a tabela da Figura 4 apresenta valores típicos para sedimentos em água doce a 20°C. Ao lado inclui-se uma tabela menor sugerindo valores de  $\alpha$ . O caso sugerido, representa uma situação pouco usual, pois, geralmente, os sedimentos em um dado domínio de modelagem tem granulometria menos variada. Não é comum haver casos com granulometria variando de areia muito fina a areia muito grossa em uma mesma região de modelagem. Em casos com granulometrias menos variadas, os valores de  $\alpha$  para o exemplo com cinco faixas de  $\tau_{oc}$  seriam menores.

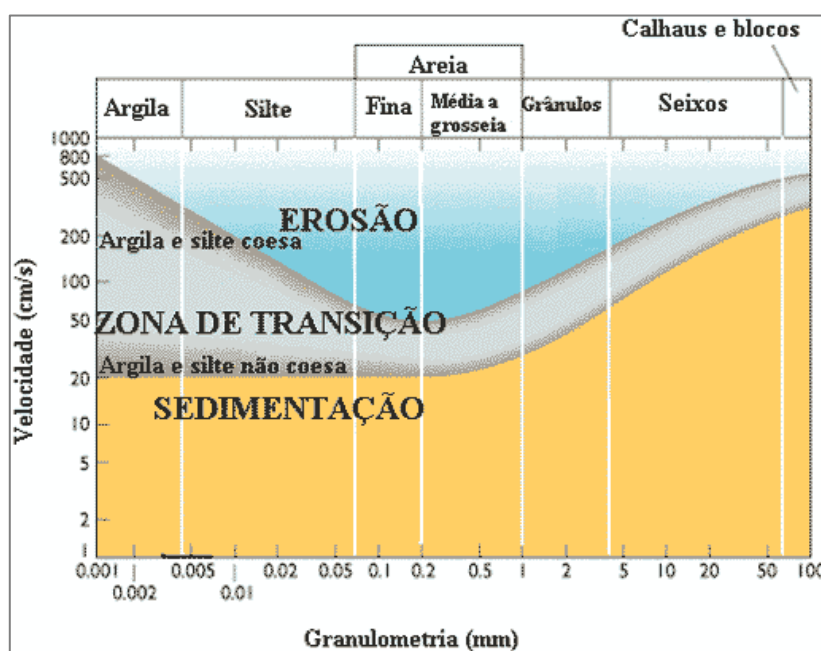
Sedimentos	d (mm)	d ( $\phi$ )	S*	$\Psi$	$\tau_{oc}$ (N/m <sup>2</sup> )
Areia Muito Fina	0.062	4.01	0.47	0.151	0.152
	0.083	3.59	0.72	0.115	0.154
	0.104	3.27	1.01	0.093	0.156
	0.125	3.00	1.33	0.078	0.158
Areia Fina	0.146	2.78	1.68	0.068	0.159
	0.166	2.59	2.06	0.060	0.163
	0.187	2.42	2.46	0.057	0.172
	0.208	2.26	2.88	0.053	0.180
	0.229	2.13	3.32	0.050	0.186
Areia Média	0.250	2.00	3.79	0.047	0.190
	0.275	1.86	4.37	0.044	0.195
	0.300	1.74	4.98	0.041	0.199
	0.325	1.62	5.62	0.039	0.204
	0.350	1.51	6.28	0.037	0.209
	0.375	1.42	6.96	0.035	0.215
	0.400	1.32	7.67	0.034	0.222
	0.425	1.23	8.40	0.033	0.231
	0.450	1.15	9.15	0.033	0.240
	0.475	1.07	9.92	0.032	0.249
Areia grossa	0.500	1.00	10.72	0.032	0.258
	0.600	0.74	14.09	0.031	0.299
	0.700	0.51	17.76	0.030	0.345
	0.800	0.32	21.69	0.033	0.428
Areia Muito Grossa	0.900	0.15	25.88	0.034	0.491
	1.000	0.00	30.32	0.034	0.558
	2.000	-1.00	85.75	0.042	1.367

Sedimentos	$\tau_{oc}$ (N/m <sup>2</sup> )	$\alpha$
Areia Muito Fina	0.155	± 10%
Areia Fina	0.172	± 15%
Areia Média	0.219	± 30%
Areia Grossa	0.391	± 40%
Areia Muito Grossa	0.962	± 50%

**Figura 4 - Exemplo de valores de tensão crítica de mobilidade  $\tau_{oc}$  para sedimentos com massa específica  $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ , água com  $\rho_o = 998,1 \text{ kg/m}^3$  e viscosidade cinemática  $\nu = 1,05E^{-06} \text{ m}^2/\text{s}$ . A tabela menor sugere valores típicos de  $\tau_{oc}$  e mostra valores de  $\alpha$  cobrindo toda a granulometria da tabela maior, o que não é comum em casos reais.**

Os processos de erosão e deposição estão relacionados aos limites superiores de velocidade de corrente necessários para colocar uma partícula em movimento e limites inferiores de velocidade da corrente, para definir o processo de sedimentação, e ainda com o diâmetro médio do sedimento. O diagrama de *Hjulström* (Figura 5) mostra curvas experimentais que relacionam a velocidade da corrente, o diâmetro do sedimento e sua relação com os fenômenos de erosão e sedimentação.





Fonte: Miedema, 2010

**Figura 5 - Diagrama de Hjulstrom.**

### 1.2.2.1 Cálculo do transporte de sedimentos

O transporte de sedimentos pode ocorrer em suspensão e por arrasto junto ao leito do corpo hídrico. A natureza do transporte depende do tamanho, formato e peso específico das partículas, e das condições hidrodinâmicas locais como velocidade e turbulência. Em condições naturais o limite entre transporte em suspensão e por arrasto, ou pelo leito, não é bem definido, porém é necessária uma definição de cada tipo para possibilitar a seleção de fórmula adequadamente:

- Admite-se que transporte em suspensão ocorre quando a velocidade de sedimentação do grão é compensada por uma sucessão de impulsos verticais provenientes de vórtices turbulentos, Bagnold (1954). Em condições extremas de velocidade, por exemplo, em rios com grande declividade e altas

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:  13
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	

velocidades, até mesmo areias grossas e pedregulhos podem ser carreados em suspensão.

- Admite-se que transporte por arrasto, ou transporte pelo leito, ocorre quando a velocidade de sedimentação do grão prevalece sobre a sucessão de impulsos verticais provenientes de vórtices turbulentos. Os movimentos dos grãos junto ao leito podem ser por rolamento, deslizamento e saltação.

Mais de uma dezena de fórmulas para cálculo de vazão sólida potencial está disponível na literatura. Embora todas sejam fórmulas bem estabelecidas, com aplicações práticas em diversos outros modelos, a escolha demanda critério, já que foram definidas por métodos semi-empíricos, presumindo condições específicas. Como o resultado obtido por diferentes fórmulas pode variar significativamente, a escolha da fórmula pode ter grande importância no resultado da modelagem. A Tabela 9 resume as formulações disponíveis no SisBaHiA – cada formulação é indicada para uma faixa granulométrica e tipo de transporte: só arraste ou total (arraste mais suspensão).

**Tabela 1 - Fórmulas de transporte sólido, com faixa granulométrica recomendável e tipo de transporte**



Fórmula	Faixa granulométrica (mm)	Arraste	Total
Meyer-Peter e Muller (1948)	0.40 - 30.0	x	-
Yalin (1963/1977)	0.30 - 30.0	x	x
Van Rijn (1984)	0.20 - 2.0	x	-
Madsen (1991)	0.08 - 6.0	x	-
Nielsen (1992)	0.6 - 30.0	x	-
Ackers & White (1973-1990)	0.04 - 4.0	x	x
Engelund e Hansen (1967)	0.08 - 45.0	x	x
Van Rijn (2007)	0.05 - 2.0	x	x

Fonte: Rosman, 2016

Neste estudo será utilizada a formulação de Van Rijn (2007). Essa metodologia é usada para o cálculo de transporte total resulta da soma do transporte de fundo por arraste, *bed load*,  $q_{sb}$ , com o transporte em suspensão,  $q_{ss}$ . De acordo com Rosman (2016), é recomendável para sedimentos na faixa granulométrica de 0,05 a 2,00 mm.

A fórmula para transporte por arraste,  $q_{sb}$ , é apresentada por van Rijn (2007) como  $q_{sb} = \alpha \rho_s UH (d_{50}/H)^{1.2} M_e^\eta$  onde o fator de mobilidade do grão,  $M_e$ , é definido como

$$M_e = (u_e - u_{cr}) / \sqrt{g(s-1)d_{50}}$$

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:  14
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	

A velocidade efetiva, considerando efeitos de ondas – com período de pico  $T_p$  e altura significativa  $H_s$  – e de correntes, é calculada por:

$$u_e = U + \gamma u_w ; u_w = \frac{\omega H_s}{2 \sinh(kH)} \quad ; \quad \omega = \frac{2\pi}{T_p}$$

Acima,  $u_w$  é o módulo da velocidade orbital no fundo gerada pelas ondas. A velocidade crítica de mobilidade de sedimentos é dada por



$$u_{cr} = \theta u_{cr,c} + (1 - \theta) u_{cr,w} \quad ; \quad \theta = U / (U + \hat{u}_\delta)$$

As velocidades críticas  $u_{cr,c}$  e  $u_{cr,w}$  devido às ações de correntes e de ondas são definidas por:

- $u_{cr,c} = 0.19 d_{50}^{0.1} \log(12H/3d_{90})$ , para  $0.00005 < d_{50} < 0.00050$  m
- $u_{cr,c} = 8.50 d_{50}^{0.6} \log(12H/3d_{90})$ , para  $0.00050 < d_{50} < 0.00200$  m
- $u_{cr,w} = 0.24 [(s - 1)g]^{0.66} d_{50}^{0.33} T_p^{0.33}$ , para  $0.00005 < d_{50} < 0.00050$  m
- $u_{cr,w} = 0.95 [(s - 1)g]^{0.57} d_{50}^{0.43} T_p^{0.14}$ , para  $0.00050 < d_{50} < 0.00200$  m

De maneira resumida, os termos e parâmetros, são:

- $q_b$  é a taxa de transporte por arraste (kg/s/m);
- $M_e$  é o parâmetro de mobilidade;
- $u_e$  é a velocidade efetiva proposta por Soulsby (1997), para estender o transporte por arraste devido apenas às correntes para áreas costeiras (correntes + ondas);
- $U$  é a velocidade da corrente média na coluna d'água;
- $\gamma$  é o parâmetro de calibração determinado através de modelo numérico detalhado na escala de comprimento de onda, van Rijn (2007). Valores recomendados:  $\gamma = 0.4$  para ondas irregulares e  $\gamma = 0.8$  para ondas regulares;
- $u_{cr}$  é a velocidade crítica média na coluna d'água;
- $u_{cr,c}$  é a velocidade crítica para as correntes determinada pelo diagrama de Shields;
- $u_{cr,w}$  é a velocidade crítica para as ondas determinada por Komar & Miller (1975);
- $\alpha$  é o coeficiente de calibração, cujo valor recomendado é 0,015;
- $\eta$  é o expoente de calibração com valor recomendado = 1,5;
- $H$  é a altura da coluna de água;

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:  15
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	

- $T_p$  é o período de pico das ondas;
- $H_s$  é a altura significativa das ondas.

Na forma adimensional, a expressão pode ser escrita em termos de velocidades como:

$$q_{sb}^* = \frac{0.015}{[g(s-1)d_{50}]^{1.25}} \left(\frac{d_{50}}{H}\right)^{0.2} U(U_e - U_{cr})^{1.5}$$

Usando as tensões de atrito efetiva e crítica dadas por:

$$\tau_e = \rho_0 \frac{g}{C_h^2} (U + \gamma u_w)^2 \quad ; \quad \tau_{cr} = \rho_0 \frac{g}{C_h^2} (\theta u_{cr,c} + (1 - \theta) u_{cr,w})^2$$

Assim, pode-se reescrever a forma adimensional da taxa de transporte de sedimentos por arraste como:

$$q_{sb}^* = \frac{0.015}{C_f^{1.25}} \left(\frac{d_{50}}{H}\right)^{0.2} \sqrt{\tau^*} \left(\frac{\text{fator de modulação}}{\text{mobilidade}}\right) (\sqrt{\tau_e^*} - \sqrt{\tau_{cr}^*})^{1.5} \left(\frac{\text{fator de mobilidade}}{\text{mobilidade}}\right); C_f = \frac{g}{C_h^2}$$

A fórmula para transporte em suspensão,  $q_{ss}$ , apresentada em Van Rijn (2007), em sua forma adimensional, em termos de velocidades, é escrita como:

$$q_{ss}^* = \frac{0.012}{[g(s-1)d_{50}]^{1.7}} D_*^{-0.6} U(U_e - U_{cr})^{2.4}$$

Usando as tensões de atrito expressas como  $\tau_e$  e  $\tau_{cr}$ , pode-se reescrever a forma adimensional da taxa de transporte de sedimentos em suspensão como:



$$q_{ss}^* = \frac{0.012}{C_f^{1.7}} D_*^{-0.6} \sqrt{\tau^*} \left(\frac{\text{fator de modulação}}{\text{mobilidade}}\right) (\sqrt{\tau_e^*} - \sqrt{\tau_{cr}^*})^{2.4} \left(\frac{\text{fator de mobilidade}}{\text{mobilidade}}\right); C_f = \frac{g}{C_h^2}$$

A expressão de van Rijn (2007) para transporte total resulta da soma de  $q_{sb}^*$  e  $q_{ss}^*$ , ou seja:

$$q_s^* = \frac{0.015}{C_f^{1.25}} \left(\frac{d_{50}}{H}\right)^{0.2} \sqrt{\tau^*} (\sqrt{\tau_e^*} - \sqrt{\tau_{cr}^*})^{1.5} + \frac{0.012}{C_f^{1.7}} D_*^{-0.6} \sqrt{\tau^*} (\sqrt{\tau_e^*} - \sqrt{\tau_{cr}^*})^{2.4}$$

No SisBaHiA®, a fórmula de van Rijn (2007) presume os coeficientes 0,015 e 0,012, além dos expoentes 1,5 e 2,4, como na equação anterior. Porém, é possível calibrar a fórmula para melhor ajuste a valores medidos (quando existirem), alterando os valores presumidos. Para a modelagem em questão, foram utilizados os valores presumidos.

### 1.2.2.2 Atualização da batimetria via modelo morfodinâmico com curva granulométrica

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	16

Em um dado local a altura da camada erodível de sedimentos no fundo por metro quadrado é dada por  $SE(x,y,t)$ . Em cada instante, a altura da camada erodível corresponde à diferença entre a cota do fundo e a cota da camada não erodível mais abaixo. Um valor inicial  $S_{E0}$  tem que ser prescrito para todos os pontos do modelo. Em geral, valores de  $S_{E0}$  são desconhecidos. Em locais de fundo não erodível, por exemplo, leito rochoso ou de concreto como em rampas a jusante de barragens, prescrever valor nulo é usual. Em locais com fundos de sedimentos, se não houver dados, deve-se prescrever valores de  $S_{E0}$  inferidos ou convenientes, como condição inicial. Valores de  $S_{E0}$  podem ser estimados considerando valores de velocidades de correntes obtidas de modelagens prévias feitas com fundo fixo. Em locais com velocidades mais intensas é provável que  $S_{E0}$  seja menor, pois a capacidade erosiva pode ser maior. Na entrada de dados iniciais para a modelagem de um dado domínio é possível definir até 10 classes de sedimentos, número mais que suficiente, considerando que a prescrição de valores adequados do parâmetro  $\alpha$ , i.e., o percentual da faixa de tolerância para tensão crítica de mobilidade, produz um efeito de continuidade entre as diferentes faixas. Cada classe de sedimento é colocada em todos os pontos da malha do domínio e é caracterizada por valores de pertinentes de



- $d_{50}$  - Diâmetro mediano (mm) – usual entre 0.05 e 5.0;
- $\rho$  - Massa específica em (kg/m<sup>3</sup>) – usual entre 1400 e 2700;
- $p$  - Porosidade – usual entre 0.2 e 0.5;
- $\tau_c$  - Tensão crítica de mobilidade em (N/m<sup>2</sup>);
- $\alpha$  - Percentual da faixa de tolerância para  $\tau_c$ .

No instante inicial, em cada ponto da malha, a curva granulométrica local é dada para o modelo através da prescrição dos percentuais de cada uma das  $M$  classes de sedimentos no ponto. Assim, uma curva granulométrica é representada pelo número de classes previamente definidas, tendo cada classe uma fração equivalente  $f_m$ , de modo que

$$\sum_{m=1}^M f_m(x, y, t) = 1,0$$

Se em um ponto a altura erodível  $S_{E0}$  for nula, pode-se adotar  $f_m = 1,0/M$  para todas as classes. Caso contrário, deve-se definir em cada ponto o valor de  $f_m$ , i.e., fração de sedimento com diâmetro mediano  $d_{50m}$ . Todos os pontos sempre têm registro das  $M$  classes de sedimentos do domínio, mesmo que o valor de  $f_m$  seja 'zero' para uma dada classe no ponto. No instante inicial,  $t_0$ , o modelo calcula o estoque inicial de sedimentos de cada classe  $S_{E0m}$ , em cada ponto:  $S_{E0m}(x, y) = f_m S_{E0}(x, y)$ .



 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	17

Ao longo do tempo, o estoque de sedimentos, ou altura erodível remanescente de cada classe de sedimentos será dada por:  $S_{Em}(x, y, t) = \max[S_{E0m}(x, y) + DS_{Em}(x, y, t); 0]$ .

A variação acumulada da altura erodível de cada sedimento,  $DS_{Em}$ , define a ordem de erosão, e esse valor é sempre medido em relação ao topo original do terreno  $S_{E0}$ . A batimetria, definida pela posição da superfície do fundo  $S_F \equiv \zeta + h(x, y, t) = 0$ , é atualizada pela equação

$$h^{n+1} = h_0 + F_{am}\delta h^{n+1} \rightarrow \delta h^{n+1} = - \sum_{m=1}^M DS_{Em}$$

onde  $h_0$  é o valor inicial de  $h$  na malha, e  $F_{am}$  é o fator de aceleração morfológica. Deve-se lembrar que a cota do fundo é dada por  $z = -h(x, y, t)$ , e que o sinal (-) na frente do somatório é necessário, pois  $DS_{Em} > 0$  significa assoreamento e  $DS_{Em} < 0$  significa erosão.



### 1.2.3 Modelo de geração de ondas

As ondas geradas por vento exercem um papel fundamental na dinâmica dos sedimentos depositados no fundo de corpos d'água naturais. A modelagem de geração de ondas permite uma estimativa da distribuição destas tensões em corpos d'água restritos, isto é, aqueles que não sofrem ação das ondas geradas em mar aberto. Nestes corpos, estas tensões têm pouca capacidade de transportar os sedimentos de uma região para outra, uma vez que estas ocorrem em decorrência do movimento oscilatório induzido pela passagem das ondas de curto período. No entanto, devido a sua magnitude, estas tensões são capazes de suspender os sedimentos depositados no fundo e, uma vez em suspensão, estes sedimentos podem ser transportados pelas correntes hidrodinâmicas induzidas por outros fatores naturais como marés e descargas fluviais.

No SisBaHiA, a geração de ondas pode ser feita acoplada ao modelo hidrodinâmico ou de maneira independente, de modo que se tenha um perfeito sincronismo entre as correntes geradas por marés e ventos e as ondas de vento geradas no interior do domínio. O modelo permite estimar características das ondas, bem como a tensão que estas causam no fundo do domínio.

#### 1.2.3.1 Estimativa das características das ondas

O mecanismo que governa a geração as ondas pelos ventos consiste na transferência de quantidade de movimento dos ventos para a superfície dos corpos de água. Para tanto, podem

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	18

ser apontados três fatores: a velocidade, a duração e a área sobre a qual este vento sopra, que é conhecida com pista.

A pista é definida como uma linha reta na qual a velocidade e duração do vento são razoavelmente constantes. Segundo o método simplificado descrito em U.S. ARMY (2001), a pista deve ser escolhida de maneira que a variação na direção não exceda 15° e as variações na intensidade não excedam 2,5 m/s da média. No caso de corpos de água restritos, os limites de terra na grande maioria das vezes são muito mais restritivos do que as condições do vento para a determinação do comprimento da pista.



Um princípio básico dos métodos de previsão de ondas diz que para uma determinada condição de vento constante, as alturas das ondas crescem na medida em que a pista aumenta, até atingirem um limite máximo, conhecido por estado de “mar completamente desenvolvido”. Em geral, este estado é atingido quando a energia transferida do ar para a superfície da água é completamente dissipada pela arrebentação das ondas. Nestas condições produz-se a máxima altura de onda que pode ser mantida por um determinado vento. Quando as ondas ainda não atingiram este estado limite, tem-se o estado de “mar em desenvolvimento”.

A partir dos anos 50, pesquisadores começaram a reconhecer que o processo de geração de ondas era mais bem descrito por leis universais de distribuição de densidade de energia num espectro. Através de considerações dimensionais e medições no oceano, Pierson & Moskowitz (1964), chegaram a um resultado clássico de espectro para mar completamente desenvolvido. A seguir está apresentado o espectro de Pierson & Moskowitz (1964) em termos da velocidade do vento.

$$E(f) = \frac{\alpha g^2 f^{-5}}{(2\pi)^4} \exp\left(0.74 \left(\frac{f}{f_u}\right)^{-4}\right),$$

onde  $f$  é a frequência,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\alpha$  é o coeficiente de Phillips (=0.0081) e  $f_u$  é a frequência limite para mar completamente desenvolvido. Este último parâmetro seria apenas dependente da velocidade do vento.

Hasselmann et al. (1973) colecionou dados do projeto JONSWAP (Joint North Sea Wave Project). A partir destes dados constatou haver uma clara relação entre o coeficiente de Phillips e o comprimento da pista. Esta constatação e outras observações, como a tendência do espectro ter um pico maior do que o do espectro de Pierson & Moskowitz em condições de mar em desenvolvimento, sugeriram que, nestas condições, outros fatores deveriam ser

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	19

levados em consideração na distribuição da energia entre ondas de diferentes frequências, além da arrebentação das ondas. Desde então, para esta distribuição de energia tem-se atribuído as iterações não lineares entre as ondas de diferentes frequências. O espectro obtido a partir dos dados do JONSWAP, que levou o nome deste experimento, é apresentado a seguir:

$$E(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp \left[ 1.25 \left( \frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right] \gamma^{\left( \frac{-(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right)}$$

onde,  $f_p$  é a frequência de pico do espectro, onde  $\sigma = 0.07$  para  $f < f_p$  e  $\sigma = 0.09$  para  $f > f_p$ ,  $\gamma = 3.3$ . Neste espectro,  $\alpha$  não é mais uma constante como no espectro de Pierson & Moscowitz (1964) e deve guardar uma relação com o comprimento da pista. U.S. ARMY (2001) fornece uma relação entre o coeficiente de Phillips e o comprimento da pista, obtida por Kitaigorodskii

(1983). Esta relação é dada por  $\alpha = 0.076 \left( \frac{gX}{u_*^2} \right)^{-0.22}$  onde,  $X$  é o comprimento da pista e  $u_*$  é

a velocidade de atrito que representa a transferência de quantidade de movimento do vento

para as ondas, definida por  $u_* = \sqrt{\frac{\tau_{aw}}{\rho_{ar}}}$ .



A tensão exercida pelo vento na superfície livre pode ser calculada por  $\tau_{aw} = \rho_{ar} C_D W_{10}^2$  onde  $C_D$  é o coeficiente de arraste do vento e  $W_{10}$  é a velocidade do vento medida a 10m da superfície livre. Para determinação deste coeficiente utilizou-se a parametrização proposta por WU (1982):  $C_D = 0.001 \cdot (0.8 + 0.065 \cdot W_{10})$ .

Historicamente, o parâmetro altura significativa, vêm sendo adotado para caracterizar um estado de mar. Para compreensão da definição deste parâmetro é necessário considerar um grupo de  $N$  alturas de ondas medidas em um ponto. Ordenando estas ondas da maior para menor, obtém-se a altura significativa através da média das primeiras (mais altas)  $N/3$  ondas.

A partir de um espectro é possível estimar valores de altura significativa e frequência de pico. Por definição, a altura significativa de um determinado espectro de ondas é dada por

$H_s = 4\sqrt{m_0}$ , onde  $m_0$  é a variância da altura das ondas obtida a partir do espectro por

$$m_0 = \sigma^2 = \int_0^{\infty} E(f) df .$$

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	20

U.S. ARMY (2001) apresenta fórmulas que governam o crescimento das ondas com a pista em águas profundas, para serem utilizadas em previsões de onda simplificadas, obtidas a partir do espectro de JONSWAP e são  $\frac{gH_s}{u_*^2} = 4.13 \cdot 10^{-2} \left( \frac{gX}{u_*^2} \right)^{\frac{1}{2}}$  e  $\frac{gT_p}{u_*} = 2.727 \left( \frac{gX}{u_*^2} \right)^{\frac{1}{3}}$ , onde  $T_p$  é o período de pico. As equações acima apresentadas são aplicáveis à situação de mar em desenvolvimento.

Estas fórmulas são aplicáveis a duas situações de geração de ondas em águas profundas. A primeira delas ocorre quando o vento sopra em direção constante, ao longo de uma pista limitada por contornos de terra por um tempo suficiente para se atingir um estado constante de mar em desenvolvimento. Nesta situação, têm-se ondas limitadas por pista. Uma segunda situação de ondas limitadas por pista pode ocorrer quando o vento sopra por um tempo limitado em uma região afastada de limites de terra, de maneira que o comprimento de pista é limitado pela duração do vento.

Equações que governam o crescimento das ondas com limitação de duração do vento podem ser obtidas convertendo duração em uma pista equivalente através da seguinte equação, cf.

U.S. ARMY (2001):  $\frac{gX_d}{u_*^2} = 1.523 \times 10^{-3} \left( \frac{gt}{u_*} \right)^{\frac{3}{2}}$  onde  $t$  é a duração do vento.  $X_d$  é a pista considerando não haver limitações espaciais para a pista, sendo esta limitada apenas pela duração do vento.

Uma terceira situação, que pode ser tratada por métodos simplificados é a de mar completamente desenvolvido. As fórmulas a seguir, podem ser utilizadas para obter a altura significativa e o período de pico do espectro para esta situação:

$$\frac{gH_s}{u_*^2} = 2.115 \cdot 10^2 \text{ ou } \frac{gT_p}{u_*} = 2.398 \cdot 10^2 .$$

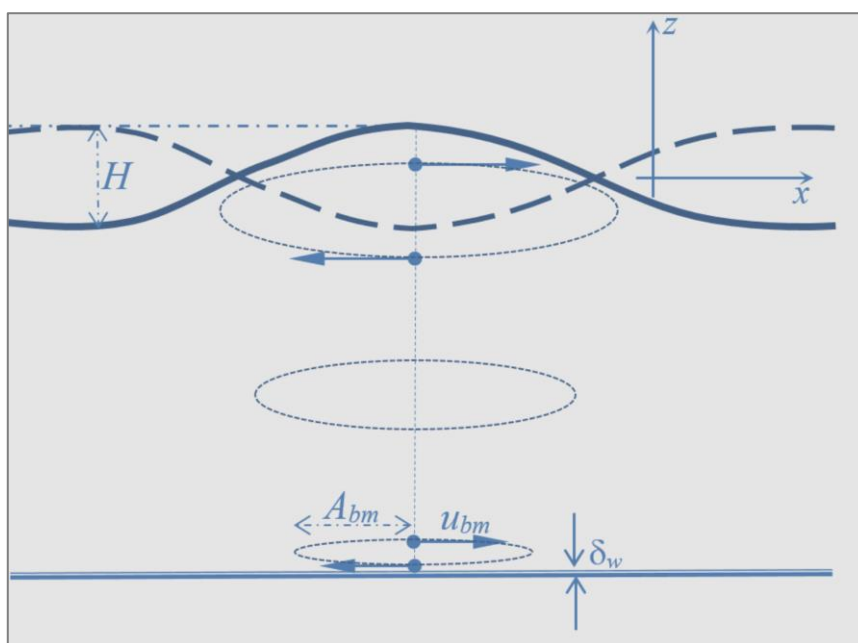
Para águas rasas, U.S. ARMY (2001) sugere que os período de pico não devem exceder o valor dado por  $T_p \approx 9.78 \left( \frac{h}{g} \right)^{\frac{1}{2}}$ , onde  $h$  é a profundidade local. Este limite de período de pico será considerado para o cálculo das tensões no fundo. Uma vez que apenas as ondas de águas rasas produzem tensões no fundo.

### 1.2.3.2 Cálculo das tensões no fundo

Para o cálculo das tensões no fundo utilizou-se o procedimento sugerido por Grant & Madsen (1986). Este procedimento considera as seguintes premissas:

Admite-se a aproximação de camada de limite para uma região de espessura muito pequena  $\delta_w$  próxima ao fundo. Fora da camada limite, ou seja,  $z > \delta_w$  é válida a teoria linear de ondas. Localmente considera-se somente a dimensão vertical e a dimensão horizontal no sentido da propagação da onda.



A Figura 6 apresenta um esquema de uma onda de altura  $H$  em águas de profundidade intermediária, trajetórias orbitais das partículas com amplitude  $A_{bm}$  junto ao fundo. As velocidades orbitais são indicadas pelos vetores e indica-se a espessura  $\delta_w$  da camada limite oscilatória no fundo.



Fonte: Rosman, 2016

**Figura 6 - Esquema de uma onda de altura  $H$  em águas de profundidade intermediária, mostrando trajetórias orbitais das partículas com amplitude  $A_{bm}$  junto ao fundo. As velocidades orbitais  $u_{bm}$  são indicadas pelos vetores e indica-se a espessura da camada limite oscilatória no fundo.**

Por causa da complexa relação entre as características da onda e a tensão do fundo, um fator de atrito frequentemente é utilizado para parametrização desta tensão em função das características das ondas. Esta parametrização, inicialmente proposta por Jonsson (1966) é

 Estudos e Projetos de Engenharia	 ADMINISTRAÇÃO DOS PORTOS DE PARANAGUÁ E ANTÔNIO	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:  22
		Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	

$\tau_{wm} = f_w \rho \frac{u_{bm}^2}{2}$ , onde  $f_w$  é o chamado fator de atrito de onda,  $u_{bm}$  é a máxima velocidade orbital induzida pela onda e  $\rho$  é a densidade da água.

A estimativa desta tensão pode ser obtida a partir de informação sobre as características das ondas, mapas de batimetria do local e algum conhecimento do material de fundo. Ou seja, é necessário conhecer  $H_s$ ,  $T_p$ , a profundidade do local  $h$  e, o tamanho médio dos grãos dos sedimentos que compõe o fundo do local.

Com as informações das ondas é possível calcular as características do movimento oscilatório no topo da camada limite. A máxima velocidade orbital  $u_{bm}$  e a amplitude das órbitas do movimento induzido pelas ondas  $A_{bm}$  no topo da camada limite podem ser obtidas através da teoria linear de ondas. As equações para  $u_{bm}$  e  $A_{bm}$  apresentadas a seguir, podem ser encontrada em diversos textos de mecânica das ondas, e.g. Dean & Darymple 1984, como

$$A_{bm} = \frac{H_s}{2 \sinh(2kh)} \quad \text{ou} \quad u_{bm} = \frac{w \cdot H}{2 \sinh(kh)} \quad \text{onde } k \text{ é o número de onda dado por: } k = \frac{2\pi}{L}; L \text{ é o comprimento da onda obtido a partir do período de pico, utilizando a equação de dispersão de ondas: } \left(\frac{2\pi}{T_p}\right)^2 = g \frac{2\pi}{L} \tanh(kh)$$

Para o cálculo do fator de atrito de onda utiliza-se duas fórmulas básicas para duas situações específicas: camada limite laminar e camada limite turbulenta.



Inicialmente é verificada a condição do escoamento na camada limite, caracterizada pelo número adimensional  $Re_{bl}$ , ou seja,  $Re_{bl} = \frac{A_{bm} u_{bm}}{\nu}$ , onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido. Para  $Re_{bl} < 2000$  tem-se a condição de camada limite laminar e o fator de atrito de onda pode ser calculado por  $f_w = \frac{1}{\sqrt{Re_{bl}}}$ . Para  $Re_{bl} > 2000$  tem-se a condição de camada limite turbulenta e o fator de atrito de onda pode ser calculado por

$$f_w = \frac{1}{\sqrt{Re_{bl}}}$$

turbulenta e o fator de atrito de onda pode ser calculado por

$$\frac{1}{4\sqrt{f_w}} + \log_{10} \left( \frac{1}{4\sqrt{f_w}} \right) = \log_{10} \left( \frac{A_{bm}}{k_n} \right) - 0.17 + 0.96\sqrt{f_w}. \quad k_n \text{ é uma rugosidade do fundo. Para a determinação de } k_n \text{ admite-se duas condições do escoamento no fundo caracterizadas por}$$

determinação de  $k_n$  admite-se duas condições do escoamento no fundo caracterizadas por

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	23

outro número adimensional  $Re_r$ , definido por  $Re_r = \frac{k_r u_{b*}}{v}$ , onde  $u_{b*} = \sqrt{\frac{\tau_{wm}}{\rho}}$  é a velocidade de atrito no fundo, e  $k_r$  é o tamanho médio dos sedimentos do fundo.

Para condição de escoamento fortemente turbulento no leito tem-se  $Re_r = \frac{k_r u_{b*}}{v} > 3.3$  e para o valor de  $k_n$  é tomado o valor de  $k_r$ . Para condição de escoamento suavemente turbulento no leito tem-se  $Re_r = \frac{k_r u_{b*}}{v} < 3.3$ ,  $k_n = \frac{3.3v}{u_{b*}}$ .



O modelo de geração de ondas apresenta também, uma estimativa da distribuição das tensões do fundo. Para realizar a estimativa da distribuição das tensões no leito de um corpo d'água devido à ação das ondas geradas por vento, inicialmente deve-se dispor das informações ambientais (condições de vento, batimetria, material do fundo) e de uma malha de pontos onde serão calculadas as tensões. Assim, a entrada de dados segue o formato utilizado no módulo hidrodinâmico do SisBaHiA, que é compatível com as necessidades deste procedimento. No modelo de circulação hidrodinâmica do SisBaHiA, o domínio é discretizado em elementos finitos quadráticos lagrangeanos retangulares ou triangulares. No modelo de geração de ondas utiliza-se esta mesma malha de pontos. No entanto, a ideia de elementos finitos é abandonada e esta discretização é usada apenas como uma distribuição de pontos de cálculo completamente independentes uns dos outros. A pista disponível é estimada para cada ponto, a partir de considerações geométricas em função da direção do vento.

#### 1.2.4 Modelo Lagrangeano de transporte advectivo-difuso

Para as modelagens do processo de dragagem é utilizado um Modelo Lagrangeano. Modelos lagrangeanos de transporte advectivo-difusivo tem a vantagem de utilizar o campo de velocidades gerado pelo modelo hidrodinâmico, sem estar restrito às eventuais limitações de escala impostas pela grade de discretização do mesmo. Portanto, pode ser eficientemente aplicado a problemas com fontes de pequena escala em relação ao domínio do modelo hidrodinâmico, ou com fortes gradientes, como se apresenta em muitos casos práticos.

Com o modelo lagrangeano, em geral as fontes contaminantes são representadas por um dado número de partículas lançadas na região fonte, em intervalos de tempos regulares. As partículas são dispostas na região fonte aleatoriamente e são advectadas pelas correntes computadas através do modelo hidrodinâmico. A posição de qualquer partícula no instante



 Estudos e Projetos de Engenharia	 ADMINISTRAÇÃO DOS PORTOS DE PARANAGUÁ E ANTÔNINA	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:  24
		Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	

seguinte,  $P^{n+1}$ , é determinada através da expansão em série de Taylor a partir da posição anterior conhecida,  $P^n$ :

$$P^{n+1} = P^n + \Delta t \frac{dP^n}{dt} + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{d^2 P^n}{dt^2} + \text{T.A.D}$$

onde T.A.D. são os termos de alta ordem desprezados. As derivadas temporais de  $P$  são obtidas a partir do campo de velocidades hidrodinâmico resolvível, ou seja:

$$\frac{dP}{dt} = \vec{V}(u, v, w)$$

$$\frac{d^2 P}{dt^2} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z}$$

onde admite-se que nas escalas resolvíveis, as velocidades que promovem o transporte advectivo das partículas,  $\vec{V}(u, v, w)$ , e as velocidades hidrodinâmicas obtidas do modelo hidrodinâmico tridimensional são as mesmas.<sup>1</sup>

A inclusão dos termos de aceleração na determinação da posição é opcional, mas permite o uso de intervalos de tempo significativamente maiores, com boa acurácia. Após a determinação da nova posição de cada partícula, um desvio aleatório, causado pelos movimentos em escalas não resolvíveis que geram “velocidades difusivas”, pode ser incluído. A magnitude do desvio aleatório é função das derivadas espaciais das difusividades turbulentas. Para entender esse processo, considere a equação de transporte Euleriano:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left[ D_{ij} + \frac{\Lambda_j^2}{12} \left| \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \Sigma R \therefore$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left( D_{ij} + \frac{\Lambda_j^2}{12} \left| \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right| \right)}_{u'_i} \frac{\partial C}{\partial x_j} + \left( D_{ij} + \frac{\Lambda_j^2}{12} \left| \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right| \right) \frac{\partial^2 C}{\partial x_j^2} + \Sigma R \therefore$$



$$\frac{\partial C}{\partial t} + (u_i - u'_i) \frac{\partial C}{\partial x_i} = \left( D_{ij} + \frac{\Lambda_j^2}{12} \left| \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right| \right) \frac{\partial^2 C}{\partial x_j^2} + \Sigma R$$

Velocidades em escalas resolvíveis, responsáveis pelo transporte advectivo.

Velocidades em escalas não resolvíveis (velocidades difusivas), responsáveis por pequenos desvios aleatórios no transporte advectivo.

Balço do transporte nas escalas não resolvíveis, ou difusão efetiva.

<sup>1</sup> Apesar de apresentado em termos de campo de velocidade 3D, o modelo de simulação de trajetória de partículas pode ser igualmente aplicado para velocidades médias na vertical.

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	25

Como indicado no esquema acima, as “velocidades difusivas” são função da variação espacial da difusividade turbulenta. Portanto o processo difusivo se divide em duas partes: uma que acrescenta incerteza à advecção e outra estritamente difusiva.

Dependendo de como o contaminante de interesse se mistura no corpo de água receptor, camadas com campos de velocidade distintos são relevantes. Por exemplo, para contaminantes flutuantes, a velocidade na superfície livre, obtida com o módulo 3D é utilizada. Para contaminantes misturados na coluna de água, as velocidades médias na vertical, obtidas no módulo 2DH, são empregadas. Em emissários, devido às diferenças de densidade do efluente e da água do oceano, é usual a formação de uma pluma de contaminantes ocupando uma camada espessa na coluna de água, geralmente com 5 a 10m de espessura, e que comumente ocupa a porção superior da coluna de água. Em tais casos, a velocidade média ao longo dessa camada é um campo de velocidade advectiva adequado.

Para efluentes saindo de uma fonte, a quantidade de massa,  $M_a$ , de uma dada espécie,  $a$ , presente em cada partícula quando essa entra no domínio modelado é dada por:



$$M_a = \frac{QC_a \times \Delta\tau}{N_p}$$

onde,  $Q$  é a descarga proveniente da fonte,  $C_a$  a concentração da substância  $a$  presente na descarga da fonte, e  $N_p$  o número de partículas que entra no domínio pela fonte por passo de tempo  $\Delta\tau$ . A posição inicial de cada partícula é atribuída aleatoriamente dentro da região fonte. As dimensões da região fonte são de tal forma que a concentração na região da fonte é igual àquela que se observa ao final do processo inicial de diluição, dentro do campo próximo de mistura da pluma de contaminante. A quantidade de massa de uma dada partícula que pode estar em uma determinada célula  $i$  da malha de concentração, cujo centro encontra-se na posição  $(x, y, z)_i$ , será determinada através da seguinte expressão:

$$m_{ai}(x, y, z) = \frac{M_a R(t_v) f}{\sum_{n=1}^{NP} f_n}$$

onde  $f$  é a função de distribuição espacial, e  $R(t_v)$  uma função de reação cinética, sendo  $t_v$  o tempo de vida, ou idade, da partícula. Diferentes funções  $f$  e  $R(t_v)$  podem ser definidas e facilmente programadas.  $NP$  é o número de partículas que contribui para a quantidade de massa em uma dada célula da malha de concentrações.

As fontes contaminantes são em sua maior parte pontos de lançamento com uma dada carga. Mas, por vezes, há uma grande quantidade de pequenos pontos ao longo de um trecho, que mais adequadamente podem ser considerados como uma linha contaminante com uma dada

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	26

carga por metro linear, como é o caso de linhas de difusores, ou de linhas de jateamento para assentamento de dutos por exemplo. A forma como tais cargas contaminantes entram no modelo Lagrangeano é através da definição de uma região fonte – são sempre volumes prismáticos, com seção horizontal elíptica ou retangular. Embora as regiões fonte sempre sejam volumes prismáticos, dependendo da escala e da forma, a mesma se comportará como uma fonte pontual, em linha, em plano ou volumétrica. Deve-se considerar que a concentração na região fonte,  $C_o$ , será função da diluição inicial ou mistura de campo próximo, sendo necessária a imposição de um fator de diluição inicial ( $S$ ). Assim, se a concentração do contaminante efluente pela fonte for  $C_e$ , a concentração na região fonte será  $C_o = C_e / S$ . Por outro lado, se uma fonte tiver uma carga  $QQ/s$ , e se o intervalo de lançamento de partículas for  $\Delta\tau$ , a quantidade total que entrará na região fonte por intervalo de lançamento será  $QQ/s \times \Delta\tau$ . Então a concentração na região fonte será  $C_o = QQ/s \times \Delta\tau / \forall$ , onde  $\forall$  é o volume prismático da região fonte. Igualando as duas expressões obtêm-se:

$$\forall = \frac{QQ/s \times \Delta\tau \times S}{C_e}$$

A carga da fonte é igual ao produto da vazão efluente,  $Q_e$ , pela concentração efluente, ou seja:  $QQ/s = Q_e \times C_e$  ou ainda  $\forall = Q_e \times \Delta\tau \times S$ .

#### 1.2.4.1 Reações cinéticas no modelo lagrangeano

Usando as definições do item anterior, a quantidade total,  $QT$ , que é liberada por uma dada região fonte em cada intervalo de tempo  $\Delta\tau$  pode ser escrita como:



$$QT = QQ/s \times \Delta\tau$$

Se em cada  $\Delta\tau$  são lançadas  $N_p$  partículas, a quantidade inicial de cada partícula,  $m_o$ , será:

$$m_o = \frac{QT}{N_p} = \frac{QQ/s \times \Delta\tau}{N_p}$$

O SisBaHiA admite que ao longo do tempo, a quantidade remanescente em cada partícula,  $m(t_v)$ , seja função de seu tempo de vida,  $t_v$ . Isto é, pode-se especificar reações cinéticas,  $R(t_v)$ , que alterem a quantidade inicial de cada partícula da seguinte forma:

$$m(t_v) = m_o R(t_v)$$

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	27

No SisBaHiA, reações cinéticas de primeira ordem, tipo exponencial, por serem um tipo de reação cinética bastante comum, podem ser especificadas através da prescrição do parâmetro  $T_{90}$ , o tempo de vida necessário para decaimento de 90% do valor inicial. Desta forma a reação cinética é escrita como:

$$R(t_v) = \exp(-K_d t_v)$$

sendo que a constante da reação,  $K_d$ , é calculada em função do  $T_{90}$  como:

$$K_d = -\ln\left(\frac{0.1}{T_{90}}\right),$$

onde o valor 0.1 corresponde a  $m(t_v=T_{90})/m_o = 0.1$ , i.e., um decaimento de 90%.

Além das reações exponenciais, qualquer outro tipo de reação cinética temporal pode ser especificada para o modelo Lagrangeano do SisBaHiA, bastando que se forneça uma tabela com valores de  $t_v \times R(t_v)$ .



#### 1.2.4.2 Modelagem de processos sedimentológicos

Pode-se usar o modelo Lagrangeano para simular transporte de sedimentos. No caso, o transporte pode ser condicionado pela tensão no fundo. A tensão no fundo pode ser causada apenas por ação das correntes ou por ação sinérgica de ondas e correntes. A seguir, descreve-se como o transporte pode ser condicionado pela tensão de fundo. Inclui-se a possibilidade de ocorrer sedimentação de partículas em suspensão na coluna de água. Entretanto, deve ficar claro que o condicionamento do transporte independe de haver ou não sedimentação. Porém, a deposição efetiva de partículas, i.e. a etapa final do processo de sedimentação, só ocorre quando não há condições de transporte da partícula que sedimenta. O processo implementado no SisBaHiA® considera:

- $V_S$  - velocidade de sedimentação média, constante;
- $\tau_{oc}$  - tensão no fundo crítica de mobilidade das partículas que sedimentam com  $V_S$ ;
- $a$  - tolerância entre 0 e 0,5.

A partir de  $V_S$  calcula-se uma taxa de sedimentação variável no tempo e espaço em função da altura da coluna de água  $H$ :

$$K_S(x, y, t) = -\ln(0,205) \times V_S / H(x, y, t),$$

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	28

$K_S$  é variável no tempo e espaço em função da altura da coluna de água  $H$  onde está a partícula em um dado instante.  $K_S$  é variável porque em um local com maior profundidade, o tempo necessário para deposição no fundo é maior que em local mais raso. Efetivamente, o sedimento só sai da coluna de água quando se deposita no fundo.



Em cada instante, se no local em que a partícula estiver a tensão no fundo exercida pelo escoamento,  $\tau_o$ , for menor que o fator  $\tau_{oc}(1 - a)$ , o modelo considera que existe pouca turbulência e as partículas sedimentam pois o escoamento não tem capacidade de transporte, portanto, o  $K_S$  da partícula é ativado e o tempo de sedimentação é contabilizado. Contrariamente, enquanto houver  $\tau_o > \tau_{oc}(1 + a)$  há muita turbulência, o escoamento tem capacidade de transporte e como não haveria deposição no fundo,  $K_S$  é desativado e o tempo de sedimentação é interrompido.

### 1.3 Implementação das modelagens matemáticas

Como citado anteriormente, o objetivo deste estudo é realizar, para a Baía de Paranaguá, as modelagens de diagnóstico e de prognóstico da circulação hidrodinâmica, da evolução morfológica do fundo da baía, e do comportamento das ondas geradas pelo vento, além das simulações de dragagem. Nesse contexto, nessa seção são apresentados os dados básicos utilizados no desenvolvimento desse estudo, a grade numérica do modelo, sua forma de calibração, os cenários simulados além dos dados necessários relacionados a cada um dos empreendimentos. Eventualmente, informações complementares podem ser apresentadas nas seções relacionadas à implementação de cada modelo.

#### 1.3.1 Dados básicos para as simulações matemáticas

A simulação numérica da hidrodinâmica de um determinado corpo hídrico exige o conhecimento detalhado das características morfológicas da área de estudo bem como o conhecimento dos principais forçantes que governam a circulação das massas de água desse ambiente. Nesse caso, os principais forçantes que governam a hidrodinâmica são a elevação da maré, as descargas de água doce advindas dos rios, e o vento. O contorno e a batimetria do estuário também são fatores importantes na definição das características hidrodinâmicas. Como são previstas alterações de batimetria (dragagens) durante a implantação das estruturas, além da batimetria atual da região de estudo, também é necessário conhecer a

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:  29
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	

batimetria futura de acordo com cada cenário de simulação – estas serão apresentadas posteriormente.

Adicionalmente, para o modelo de evolução morfológica (transporte de sedimentos) é necessário conhecer, para todo o fundo da baía, as classes de sedimento presentes e a quantidade inicial de cada um deles. Como condição de contorno, devem ser consideradas vazões sólidas de sedimentos nos pontos em que há afluência significativa ao estuário.

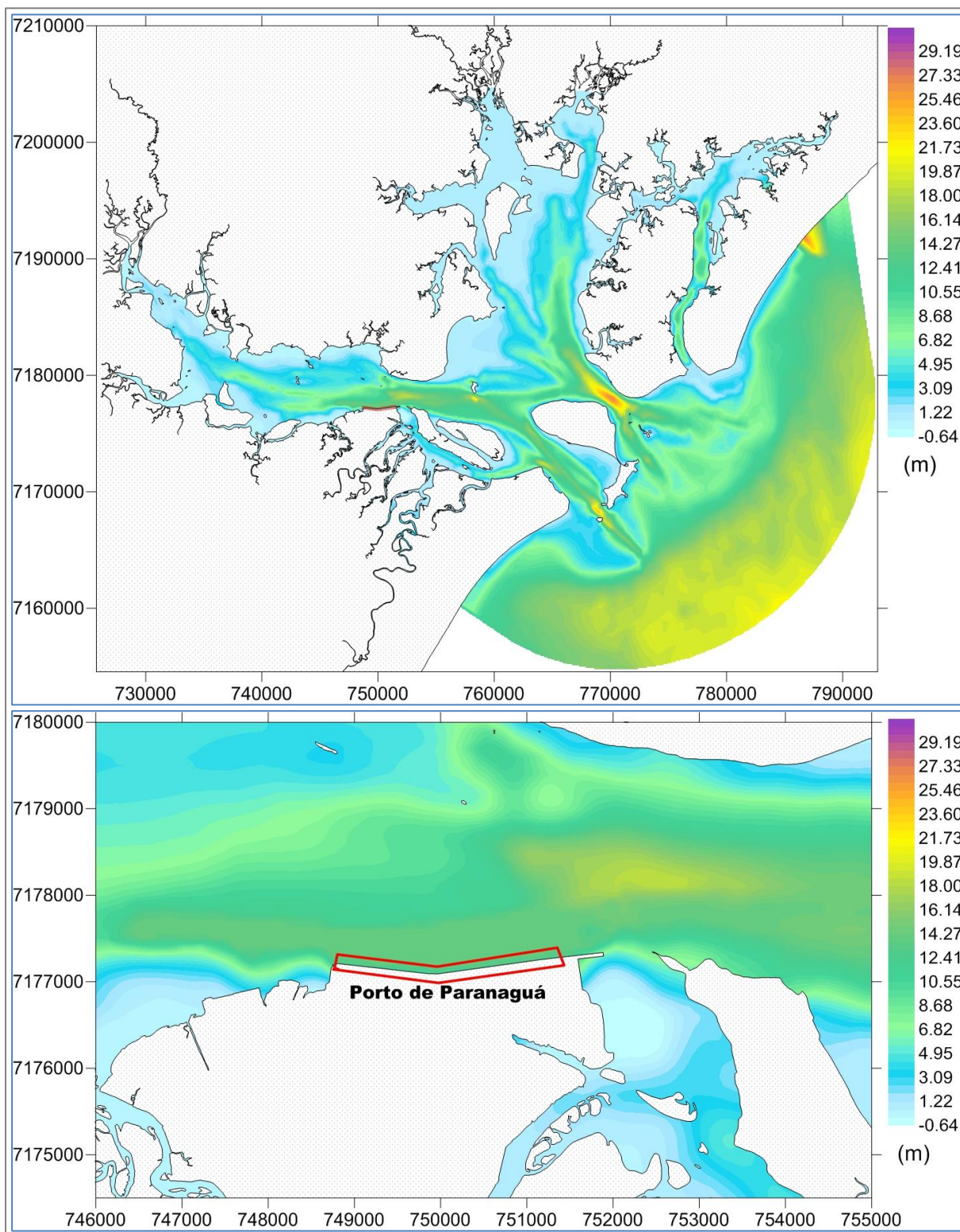
Para as simulações de dispersão de sedimentos durante os processos de dragagens são necessários dados relacionados aos sedimentos, informações relacionadas às dragas utilizadas e ao procedimento de dragagem propriamente dito. Nesse contexto, na sequência são apresentados os dados utilizados nesse estudo.

### 1.3.1.1 Contorno e batimetria

Para simular a circulação no interior da baía é necessária a definição do contorno do corpo d'água com o maior nível de detalhamento possível. Em simulações numéricas é usual que se estendam os limites da área modelada além da área de maior interesse. Isso é feito para que eventuais imprecisões nas condições de contorno não influenciem os resultados no interior do domínio de interesse. Com esse procedimento se faz necessário, por exemplo, a obtenção de dados batimétricos no interior dos mesmos (região de maior interesse) e das áreas exteriores. Os dados da batimetria atual da Baía de Paranaguá foram obtidos a partir da digitalização de cartas náuticas do litoral paranaense, dados de projetos realizados anteriormente, dissertações e teses do Centro de Estudos do Mar da UFPR, além de informações do banco de dados da EnvEx Engenharia e Consultoria e dados levantados especificamente para este estudo. A Figura 7 apresenta a batimetria de todo o domínio de simulação (acima) e um detalhe da região de maior interesse (abaixo) incluindo a área onde foi realizado levantamento de batimetria específico para este estudo. Todas as informações de batimetria foram processadas em ambiente SIG.



Deve-se mencionar que, na batimetria atual, além dos dados descritos acima, também foi considerado o aprofundamento dos canais de acesso ao porto, os quais estão sendo atualmente (2017) dragados – conforme a LP nº 457/2013.





**Figura 7 – Batimetria da Baía de Paranaguá utilizada nas simulações de diagnóstico (acima) e zoom na batimetria da região de maior interesse desse estudo (abaixo).**



 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:  31
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	

### 1.3.1.2 Vazões afluentes à Baía de Paranaguá

Dentro dos estuários, as vazões afluentes pelos rios que drenam as bacias hidrográficas localizadas na Serra do Mar, além daqueles da própria planície litorânea, são importantes para a dinâmica da água e para os processos que envolvem o transporte de sedimentos no interior da baía. Os rios que mais podem contribuir para a circulação da água na baía são aqueles que apresentam as maiores vazões.



As vazões utilizadas nesse estudo foram obtidas em estudos anteriores realizados pela EnvEx Engenharia e Consultoria. Estes foram obtidos do portal HydroWeb, da Agência Nacional de Águas. Para os rios que não são monitorados, as vazões foram determinadas pelo método de regionalização de vazões (Tucci, 2002). As vazões das estações Marumbi (82195000), Anhaia (82198000), Morretes (82170000) e Marta-Sagrado (82198300) foram somadas, uma vez que estas drenam para uma mesma entrada da baía – a bacia do rio Nhundiaquara. Da mesma forma, as vazões das estações Rio do Nunes (82140700) e Cacatu (82139500) foram somadas para determinar a vazão no Rio do Nunes. A partir de toda a série temporal disponível para cada estação, foi calculada uma vazão média anual. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 2. O método de regionalização de vazões considera a proporcionalidade entre a área de drenagem correspondente ao ponto de medição das vazões e a área de drenagem de cada um dos rios considerados, assim maiores regiões de drenagem possuem maiores vazões, e vice-versa.

**Tabela 2 - Vazões utilizadas para a modelagem hidrodinâmica da Baía de Paranaguá.**

Rio	Vazão média anual (m³/s)	Estações
Nhundiaquara	37,72	Marumbi (82195000), Anhaia (82198000), Morretes (82170000), Marta-Sagrado (82198300)
Nunes	6,91	Rio do Nunes (82140700), Cacatu (82139500)
Cachoeira	42,41	Ponte Velha BR -101 (82121003)
Faisqueira	10,47	Estimado
Tagaçaba	7,25	Passo do Vau (82009080)
Guaraqueçaba	6,23	Colônia Rio Verde (82002000)

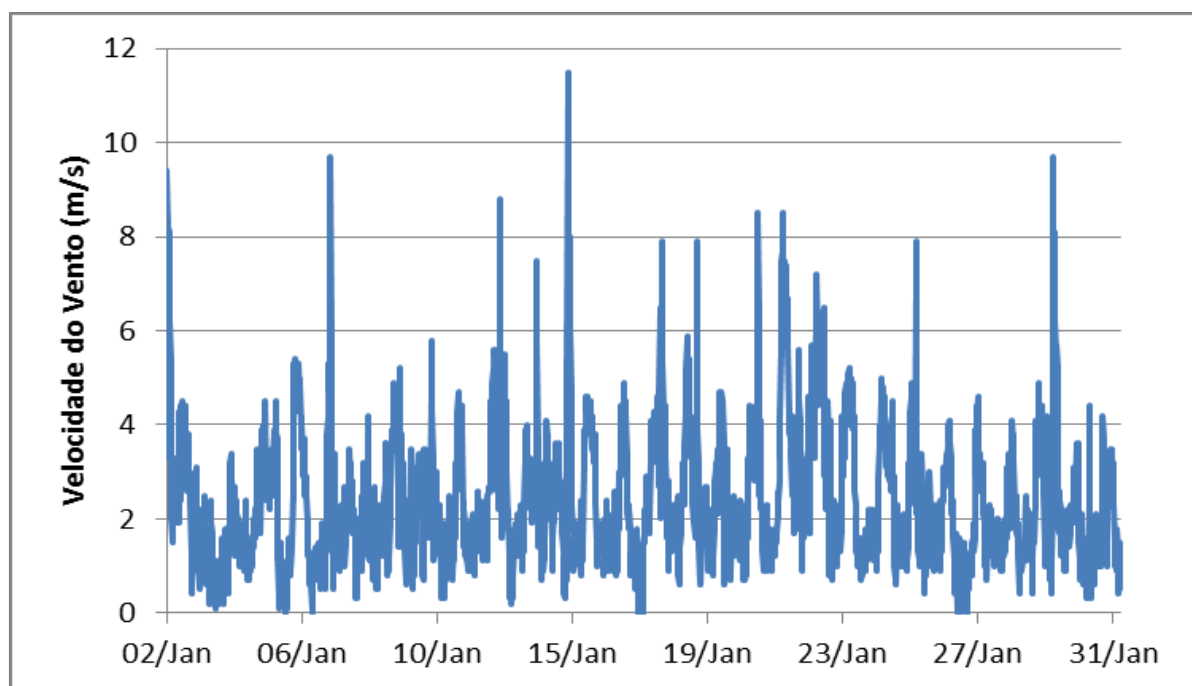
### 1.3.1.3 Intensidade e direção do vento

Os dados de intensidade e direção do vento foram obtidos na estação meteorológica Paranaguá (Simepar), localizada em Paranaguá. Para o Verão foram utilizados dados medidos no período de 02 de janeiro a 31 de janeiro de 2016 e para o Inverno, foram utilizados

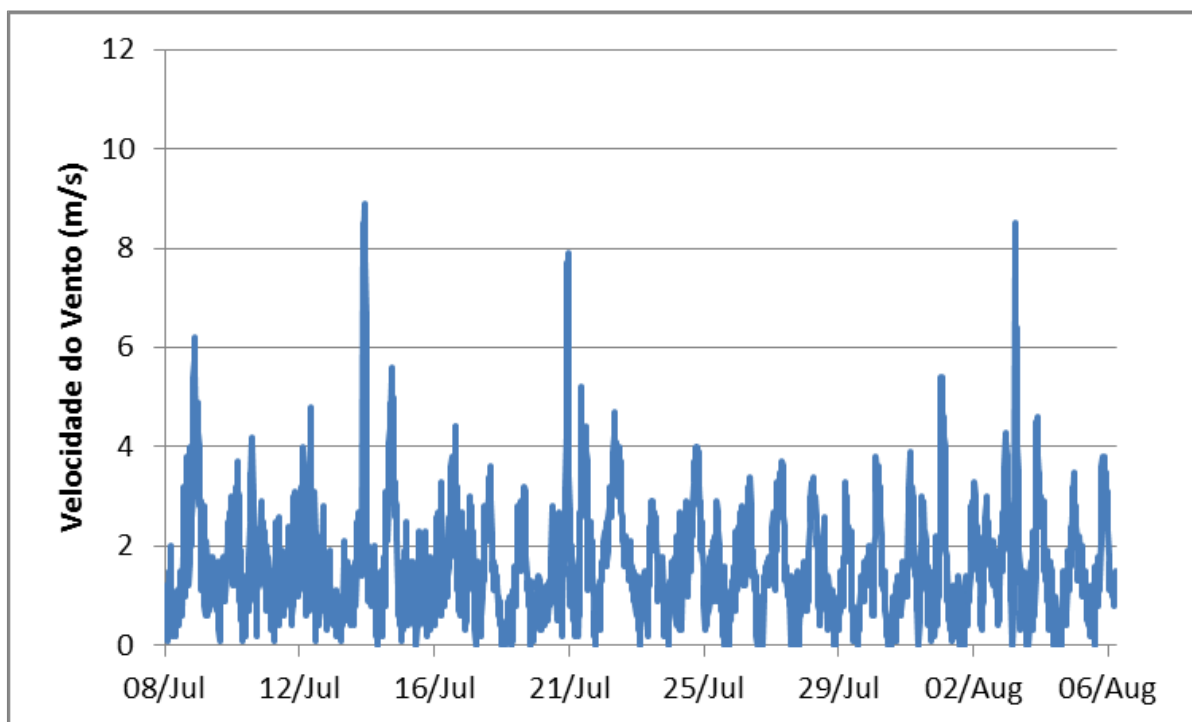
 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:  32
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	

dados medidos entre 08 de julho e 06 de agosto de 2015. Para este estudo foram utilizados dados medidos com frequência de 15 minutos.

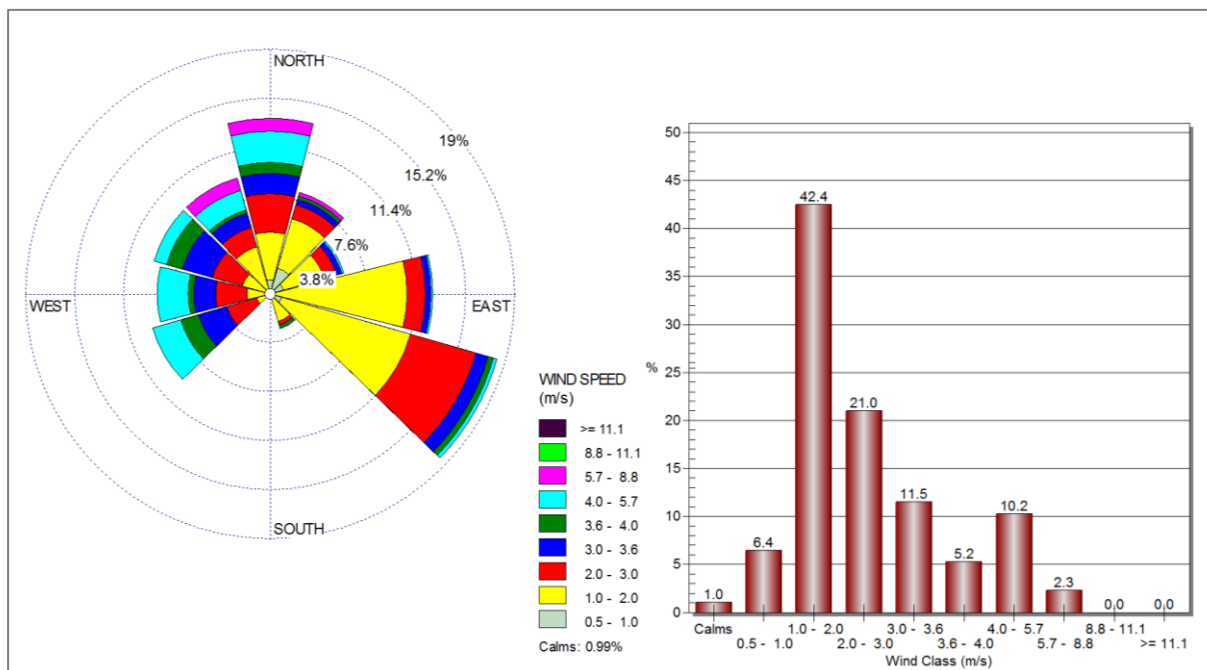
As séries temporais de intensidade do vento são apresentadas na Figura 8 e na Figura 9, respectivamente para os períodos de verão e de inverno. Na Figura 10 (verão) e na Figura 11 (inverno), são apresentadas as rosas dos ventos obtidas para cada um dos dois períodos considerados; nessas figuras também são apresentados os percentuais de ocorrência de diferentes intervalos de intensidade de velocidade. Em termos de ocorrência de intensidade de velocidades, nos dois períodos observa-se uma predominância de ventos entre 1,0 e 2,0 m/s; predominantemente, esses ventos sopram de sudeste para noroeste.



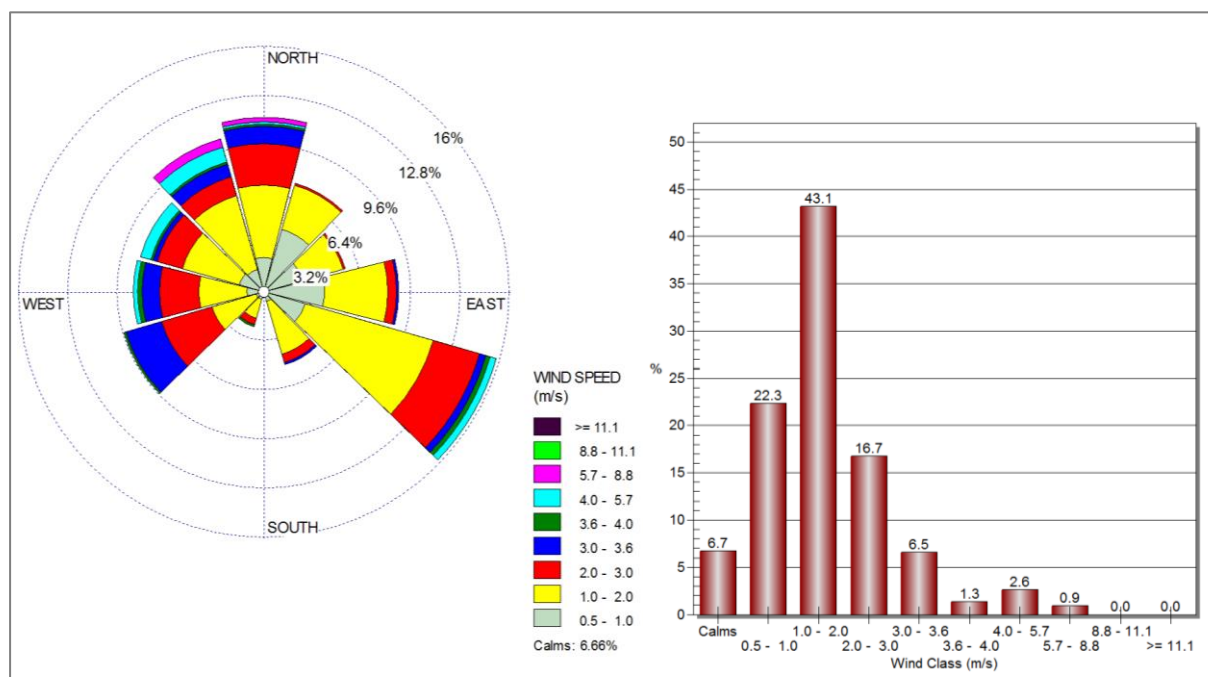
**Figura 8 - Velocidades do vento – Verão.**



**Figura 9 - Velocidades do vento – Inverno.**



**Figura 10 – Rosa dos ventos (esquerda) e percentuais de ocorrência de velocidades do vento (direita) – Verão.**





**Figura 11 – Rosa dos ventos (esquerda) e percentuais de ocorrência de velocidades do vento (direita) – Inverno.**

Para as simulações de geração de ondas é necessário conhecer um valor médio de duração do vento, isto é, por quantas horas o vento sopra seguidamente numa mesma direção. Para definir o tempo de duração do vento das duas séries de vento utilizadas, foi realizada uma análise detalhada desta variável; esta análise é apresentada na seção 1.3.5.

#### 1.3.1.4 Sedimentos de fundo

Para as simulações da evolução morfológica ou transporte de sedimentos são necessárias informações relacionadas ao tipo de sedimento presente no fundo da baía. Com base em informações levantadas em campo, é realizada uma interpolação geoestatística que resulta em distribuições espaciais de sedimento de fundo em toda a extensão da área de interesse. O atributo dos elementos da imagem gerada por geoprocessamento é a unidade de medida  $\phi$  ( $\phi$ ), que corresponde ao diâmetro da partícula do sedimento; este diâmetro é associado à Escala Granulométrica de *Wentworth*, conforme a Tabela 3. A Escala Granulométrica de *Wentworth* faz parte das definições da Resolução CONAMA 454/2012, que estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional.

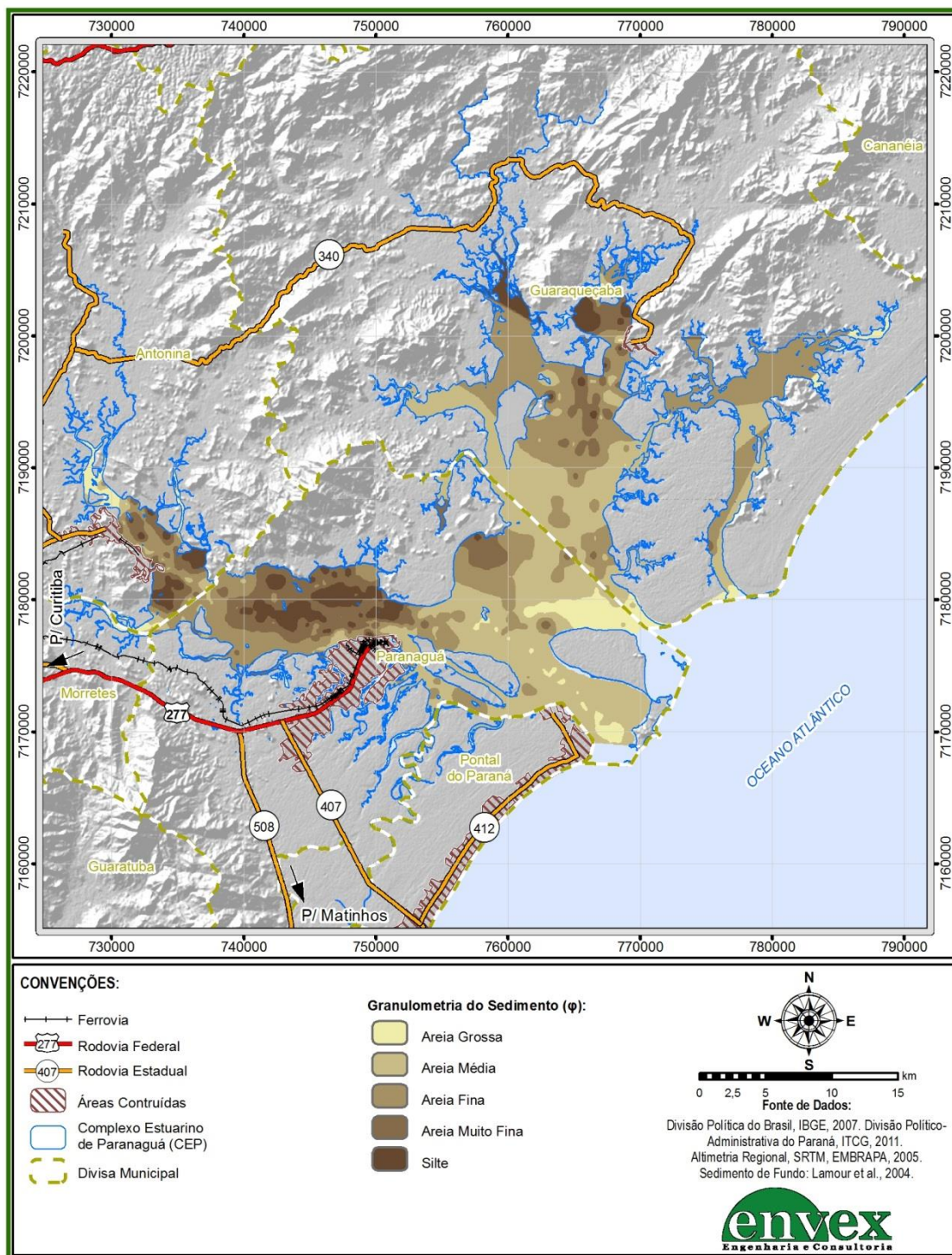
 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:  35
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	

**Tabela 3 - Classificação granulométrica dos sedimentos conforme a Escala Granulométrica de Wentworth (1922).**

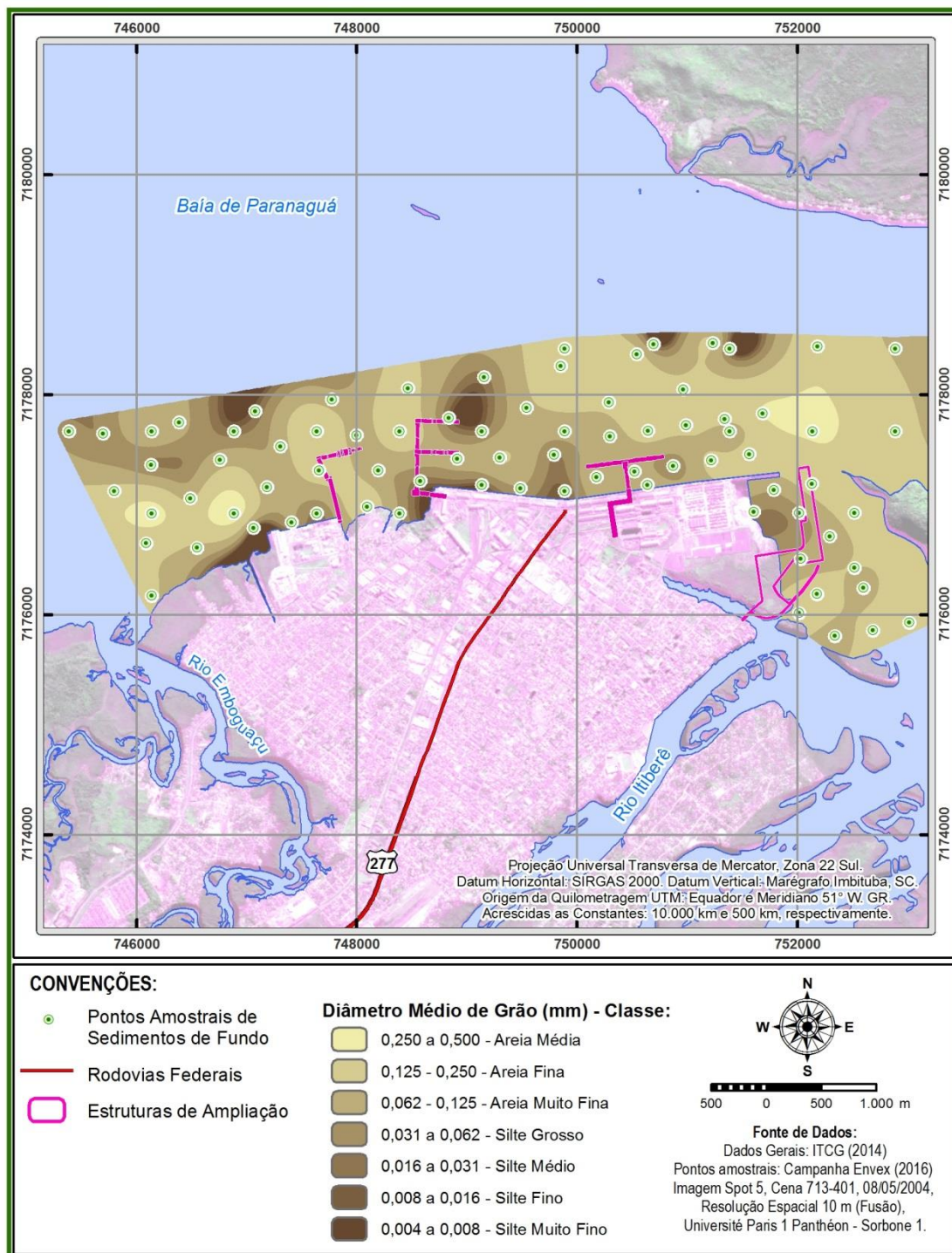
Classificação	phi ( $\phi$ )	Tamanho dos grãos (mm)
Areia muito grossa	-1 a 0	2 a 1
Areia grossa	0 a 1	1 a 0,5
Areia média	1 a 2	0,5 a 0,25
Areia fina	2 a 3	0,25 a 0,125
Areia muito fina	3 a 4	0,125 a 0,062
Silte	4 a 8	0,062 a 0,00394
Argila	8 a 12	0,00394 a 0,0002

Para grande parte da área de interesse, os dados de sedimento do fundo da Baía de Paranaguá, foram obtidos no trabalho de Lamour *et al.* (2004) – estes são reproduzidos Figura 12. Levantamentos específicos para a área de interesse deste estudo também foram realizados, e uma caracterização detalhada é apresentada Figura 13. Observa-se, de maneira geral, presença de silte mesclado a areia muito fina na baía de Antonina e em grande parte da baía de Paranaguá, principalmente na região mais próxima à foz dos maiores rios, por onde as águas continentais são drenadas. Próximo à área urbana de Paranaguá tal panorama passa a dar lugar ao sedimento composto por areia fina e média, nas proximidades da Ilha da Cotonga e na baía das Laranjeiras. Por fim, observa-se a presença de areia grossa a leste da Ilha do Mel e na região costeira adjacente (PLDM, 2010). De maneira geral, os sedimentos presentes na Baía de Paranaguá compreendem o intervalo entre silte e areia grossa, com diâmetros entre cerca de 0,004 mm e 1,0 mm.







**Figura 12 - Distribuição da Granulometria do Sedimento de Fundo na Baía de Paranaguá.**



**Figura 13 - Levantamento dos sedimentos de fundo realizado para este estudo.**



 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:  38
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	

### 1.3.1.5 Vazões sólidas afluentes

Conforme mencionado anteriormente, outra informação necessária para as modelagens de evolução morfológica é a quantificação do aporte de sedimentos através dos pontos onde há afluição de água à baía (rios); essas informações compreendem as condições de contorno para a modelagem da dinâmica dos sedimentos no fundo.

Os dados de aporte de sedimentos utilizados neste estudo são baseados em Mantovanelli (1999) – foram levantados dados de vazão, concentração de material particulado em suspensão (MPS), fluxo diário de MPS e área total das bacias de drenagem para o verão de 1997 e para o inverno de 1998, conforme Figura 14 e Figura 15.

rio	$Q_T$ (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	MPS (mg l <sup>-1</sup> )	$Q_s$ g s <sup>-1</sup>	fluxo (kg km <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	área total (km <sup>2</sup> )
Cachoeira	25,34	8,22	232,60	48,41	415,13
Nhundiaquara	2,36	0,72	1,80	0,69	223,93
Sagrado	0,40	4,63	3,54	2,25	136,03
Marumbi	0,59	1,24	0,87	0,69	107,93
Pinto	0,61	6,30	3,93	4,21	80,61
Faisqueira	0,50	2,34	2,58	3,83	58,17
Sapetanduva	0,11	2,47	0,48	0,95	43,91
Nunes	0,55	0,00	0,00	0,00	36,94
Cacatu	0,44	0,18	0,10	0,23	36,36
Jacareí	0,15	1,93	0,40	1,00	34,29
Rio do Cedro	0,44	0,44	0,30	0,84	31,46
Cupiúva	0,10	9,15	4,02	13,31	26,08
Xaxim	0,10	1,49	0,20	0,69	25,54
São Joãozinho	0,00	9,23	0,00	0,00	24,22
Passa Sete	0,03	14,23	0,71	2,94	20,79
Rio do Meio	0,00	0,00	0,00	0,00	19,80
Piedade	0,27	38,71	11,39	54,46	18,07
Moura	0,02	2,40	0,07	0,59	9,72
Curitibaíba	0,05	0,57	0,03	0,30	9,14
Rio da Venda	0,43	3,64	2,19	20,89	9,04

Fonte: Mantovanelli (1999).

**Figura 14 - Campanha de coleta de dados no verão de 1997 (dias 13, 15 e 16/02/1998).**

rio	$Q_r$ (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	MPS (mg l <sup>-1</sup> )	$Q_s$ (g s <sup>-1</sup> )	fluxo (kg km <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	área total (km <sup>2</sup> )
Cachoeira	46,85	22,94	1074,79	223,69	415,13
Nhundiaquara	34,95	13,09	457,51	176,52	223,93
Sagrado	7,15	40,98	191,62	121,71	136,03
Marumbi	12,46	1,15	14,28	11,43	107,93
Pinto	5,14	53,10	273,17	292,80	80,61
Faisqueira	5,82	22,88	123,50	183,43	58,17
Sapetanduva	3,53	14,48	51,12	100,59	43,91
Nunes	2,62	0,14	0,38	0,89	36,94
Cacatu	7,23	0,26	1,85	4,39	36,36
Jacareí	3,34	6,57	21,95	55,31	34,29
Rio do Cedro	2,92	4,16	12,18	33,44	31,46
Cupiúva	2,51	23,70	59,58	197,36	26,08
Xaxim	2,07	7,81	16,18	54,73	25,54
São Joãozinho	1,24	8,52	10,60	37,79	24,22
Passa Sete	0,82	14,66	11,98	49,81	20,79
Rio do Meio	0,61	0,48	0,30	1,29	19,80
Piedade	1,71	9,89	16,92	80,93	18,07
Moura	0,48	12,60	6,11	54,28	9,72
Curitibaíba	0,33	11,13	3,70	34,98	9,14
Rio da Venda	1,81	3,76	6,80	65,00	9,04

Fonte: Mantovanelli (1999).

**Figura 15 - Campanha de coleta de dados no verão de 1998 (dias 12 e 13/02/1998).**

No modelo devem ser inseridos dados de carga de sedimentos nos mesmos pontos onde há aporte de vazão líquida, ou seja, nos rios Guaraqueçaba, Tagaçaba, Faisqueira, Cachoeira, Nunes, e Nhundiaquara. Para tanto, seguindo a mesma ideia das vazões afluentes, a partir dos valores para inverno e verão apresentados por Mantovanelli (1999), foram calculadas as concentrações médias de material particulado em suspensão para cada um dos rios citados anteriormente; estas são apresentadas na Tabela 4 para as situações de inverno e verão. Para os afluentes em que não há dados, foram utilizadas as médias de MPS medidos em todos os rios.

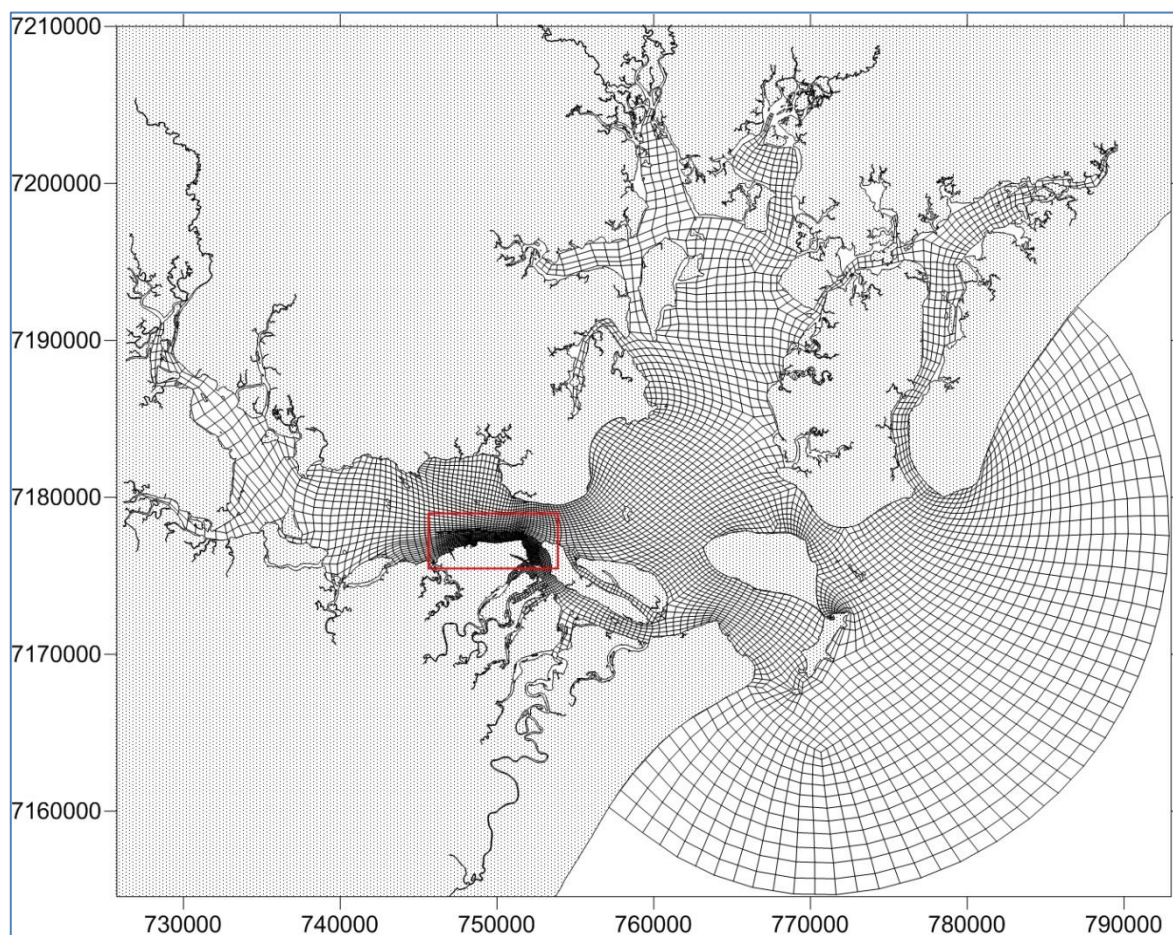
**Tabela 4 – Concentrações de material em suspensão utilizados nas simulações.**

Rio	Material particulado em suspensão (mg/L)
Nhundiaquara	6,905
Nunes	0,07
Cachoeira	15,58
Faisqueira	12,61
Tagaçaba	2,01
Guaraqueçaba	2,01

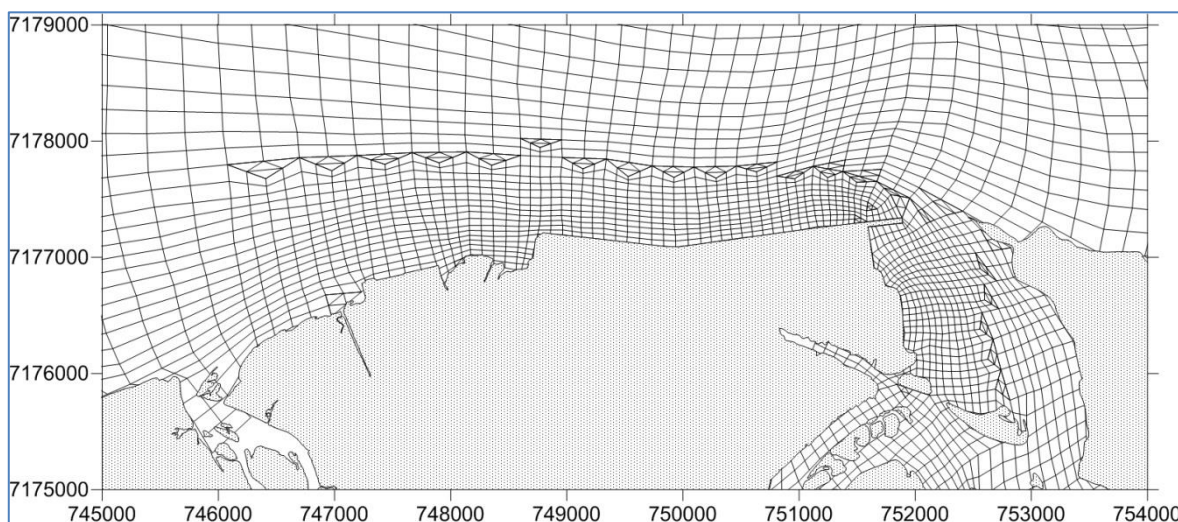


### 1.3.2 Grade numérica para modelagem

O SisBaHiA® usa o método dos elementos finitos para a discretização espacial e o método de diferenças finitas para a discretização temporal. Desta forma, o domínio de modelagem deve ser discretizado em elementos sobre os quais são realizados os cálculos. Os elementos podem possuir seis ou nove pontos de cálculo, sendo três nos vértices no caso de elementos triangulares, ou quatro no caso de elementos quadrangulares; ambos os tipos são utilizados neste estudo. Os pontos de cálculo são denominados nós. A malha usada na discretização do domínio é mostrada na Figura 16; na Figura 17 é apresentado o detalhamento da grade na área de maior interesse nesse estudo – nesta região optou-se por utilizar uma malha mais detalhada do que no restante do domínio. Esta malha é composta por 1772 elementos quadrangulares, 41 elementos triangulares, totalizando 7871 nós.



**Figura 16 - Grade numérica do modelo para toda a área de estudo. Em vermelho: área de interesse desse estudo.**





**Figura 17 - Detalhe da grade numérica do modelo – região de maior interesse do estudo.**

Para a implementação da grade é necessário o contorno da região de estudo e dados de batimetria – para a situação atual, estes foram apresentados na seção 1.3.1.1; para as situações futuras, que sofrerão alterações de batimetria, as informações são apresentadas na seção 1.3.3. Outra informação necessária é o coeficiente de atrito do fundo, o qual pode ser calculado via coeficiente de Chèzy. Este coeficiente depende da amplitude da rugosidade equivalente de fundo, definida a partir da composição e da distribuição de sedimentos. Para cada ponto da malha, a rugosidade equivalente de fundo foi definida considerando a distribuição espacial de sedimentos apresentada na seção 1.3.1.4. Os valores de amplitude da rugosidade equivalente para cada tipo de sedimento são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5 - Rugosidades equivalentes de fundo utilizadas para cada tipo de sedimento.**

Tipo do sedimento	Rugosidade equivalente de fundo (m)
Areia grossa	0,0375
Areia média	0,0200
Areia fina	0,0150
Areia muito fina	0,0070
Silte grosso	0,0050
Argila	0,001

### 1.3.3 Calibração do modelo

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	42

Neste estudo, a calibração do modelo foi realizada a partir de dados de elevação da superfície livre medidos, os quais permitiram simular a maré astronômica e obter um conjunto de constantes harmônicas capaz de reproduzir suas variações dentro da baía de Paranaguá. O processo de calibração é brevemente descrito abaixo.

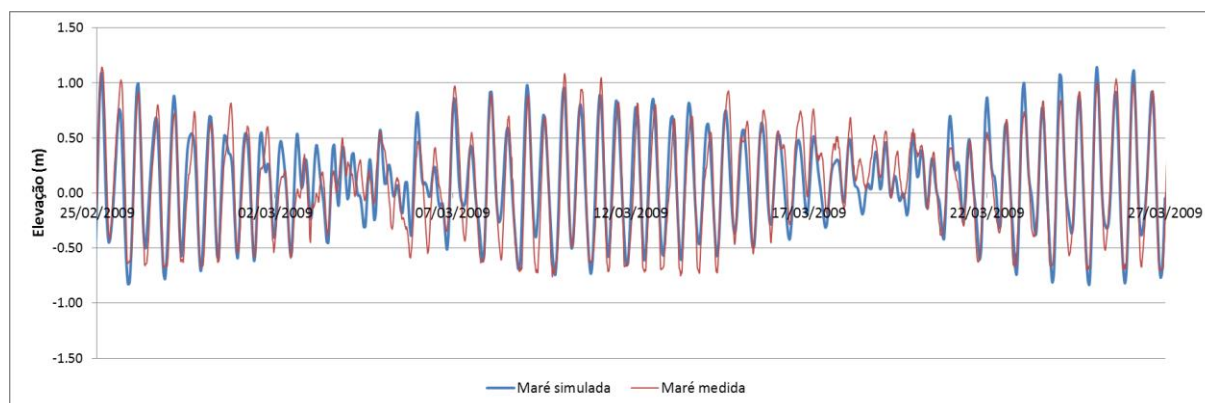
Para simular a maré astronômica forçando a circulação no interior da baía é necessário definir um conjunto de constantes harmônicas no contorno aberto (área externa). Para obter esse conjunto de constantes, podem ser utilizados dados de nível de maré medidos. O conjunto de constantes harmônicas pode ser obtido através do modelo SisBaHiA utilizando a ferramenta de Análise de Maré – a partir dos dados medidos esta ferramenta gera um conjunto de constantes harmônicas capaz de reproduzir variações aproximadamente iguais àquelas medidas – caso este conjunto de constantes não gere resultados satisfatórios, ele pode ser ajustado de forma a representar melhor as variações de nível de maré no ponto de interesse.

Para as simulações realizadas nesse estudo, as constantes harmônicas foram obtidas a partir dos dados de superfície livre medidos pela EnvEx por meio do CEM (Centro de Estudos do Mar) no Canal da Cotinga (Lat: -25° 33'16" Long: -48° 24'36") no período de 24/02/2009 a 27/03/2009. Utilizando a ferramenta de Análise de Maré do SisBaHiA e os dados do Canal da Cotinga, foi obtido um conjunto de constantes harmônicas semelhante ao apresentado na Tabela 6. A partir desse conjunto inicial, foi realizada uma calibração dessas constantes.

O procedimento para a calibração foi feito variando as amplitudes das constantes harmônicas mais significativas, a saber:  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $O_1$  e  $M_3$ . Assim, diversos conjuntos de constantes, diferenciados por valores de  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $O_1$  e  $M_3$  foram testados no modelo hidrodinâmico mantendo as demais constantes – foram realizadas simulações hidrodinâmicas para aproximadamente um mês (24/02/2009 a 27/03/2009) utilizando dados de vento referentes a esse período. Comparações entre as elevações medidas e modeladas foram realizadas.

O conjunto de constantes que gerou os melhores resultados é o apresentado na Tabela 6. A Figura 18 mostra a comparação entre os valores da elevação da superfície livre modelados e os valores medidos. Nota-se uma boa concordância entre os resultados no que se refere à fase e à amplitude. Assim, é possível afirmar que a simulação numérica usada para caracterizar a circulação hidrodinâmica do CEP é adequada e pode ser usada de modo qualitativo.







**Figura 18 - Comparação entre os valores de elevação (posição da superfície livre) obtidos pelo modelo (vermelho) e os valores medidos (azul) no Canal da Cotonga.**

**Tabela 6 - Constantes harmônicas utilizadas nas modelagens.**

Constante	Período (seg)	Amplitude (m)	Fase (rad)
S <sub>2</sub>	43200,00	0,3931	1,47
M <sub>2</sub>	44714,16	0,3793	1,31
O <sub>1</sub>	92949,63	0,1156	1,27
M <sub>3</sub>	29809,44	0,1020	3,97
M <sub>4</sub>	22357,08	0,0817	3,54
K <sub>1</sub>	86164,09	0,0760	2,57
MS <sub>4</sub>	21972,02	0,0613	1,05
MK <sub>3</sub>	29437,70	0,0599	3,37
MN <sub>4</sub>	22569,03	0,0572	4,95
Q <sub>1</sub>	96726,08	0,0308	1,14
M <sub>1</sub>	89399,69	0,0138	4,93
MO <sub>3</sub>	30190,69	0,0131	2,06
N <sub>2</sub>	45570,05	0,0111	3,40
SK <sub>3</sub>	28773,74	0,0071	5,25
M <sub>sf</sub>	1275721,42	0,0065	4,90
OO1	80301,87	0,0052	3,61
S <sub>4</sub>	21600,00	0,0052	4,52
2SM6	14564,40	0,0052	4,78
J <sub>1</sub>	83154,52	0,0035	4,09
KQ <sub>1</sub>	77681,65	0,0033	3,48
2Q <sub>1</sub>	100822,40	0,0030	1,02
2MS6	14732,60	0,0020	4,89
2MK5	17751,17	0,0019	1,41
KJ <sub>2</sub>	42316,28	0,0014	3,76
M <sub>6</sub>	14904,72	0,0014	0,78
M <sub>8</sub>	11178,54	0,0012	4,84
2MN6	14998,62	0,0009	2,68
3MK7	12706,71	0,0008	3,60
2SK5	17270,54	0,0003	4,14

#### 1.3.4 Implementação das simulações de hidrodinâmica e transporte de sedimentos

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	44

Com o objetivo de avaliar possíveis diferenças sazonais na circulação hidrodinâmica e no transporte de sedimentos foram definidos dois períodos com características hidrológicas e meteorológicas diferentes, sendo estes:

- Verão: ciclo típico de maré de verão, considerando informações de intensidade e direção do vento no período compreendido entre 02 de janeiro e 31 de janeiro de 2016, vazões médias dos rios afluentes à baía de Paranaguá, e dados de afluência de sedimentos característicos da região de estudo (conforme seção 1.3.1);
- Inverno: ciclo típico de maré de inverno, considerando informações de intensidade e direção do vento no período compreendido entre 08 de julho e 06 de agosto de 2015, vazões médias dos rios afluentes à baía de Paranaguá, e dados de afluência de sedimentos característicos da região de estudo (conforme seção 1.3.1).

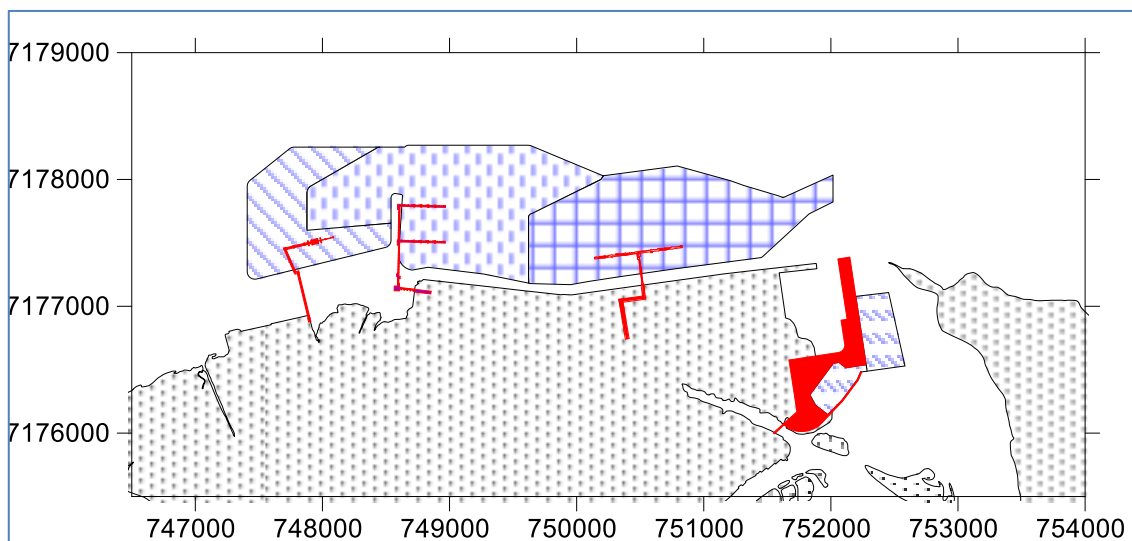
Cada um dos dois períodos foi atrelado à situação atual da baía e às suas situações futuras, ou seja, considerando a implantação de cada um dos empreendimentos – isto engloba diagnóstico e prognóstico. Assim, para as situações de diagnóstico, foram definidos os seguintes cenários de simulação:

- Diag-Verão: considera as características da situação de Verão, e batimetria atual do reservatório (conforme seção 1.3.1.1); e
- Diag-Inverno: considera as características da situação de Inverno, e batimetria atual do reservatório (conforme seção 1.3.1.1).

Para os cenários que consideram as situações futuras é necessário que os empreendimentos a serem implantados estejam representados no modelo. Nesse sentido, é necessário conhecer algumas características de cada um deles. De acordo com o Capítulo 5 as estruturas de ampliação compreendem a implantação de 3 píeres e de um Complexo Náutico composto por uma marina e um terminal de passageiros. Para a implantação de cada estrutura está prevista dragagem de áreas para facilitar a navegação. Na Figura 19, de forma simplificada, são apresentadas as estruturas de ampliação (em vermelho) e respectivas áreas de dragagem (em azul); a implantação das estruturas deverá ocorrer em diferentes períodos de tempo, na seguinte ordem:

- Pier T;
- Pier F;
- Complexo Náutico;
- Píer L.





**Figura 19 – Localização das estruturas de ampliação (vermelho) e áreas de dragagem (azul) – da esquerda para a direita: Píer L, Píer F, Píer T e Complexo Náutico.**

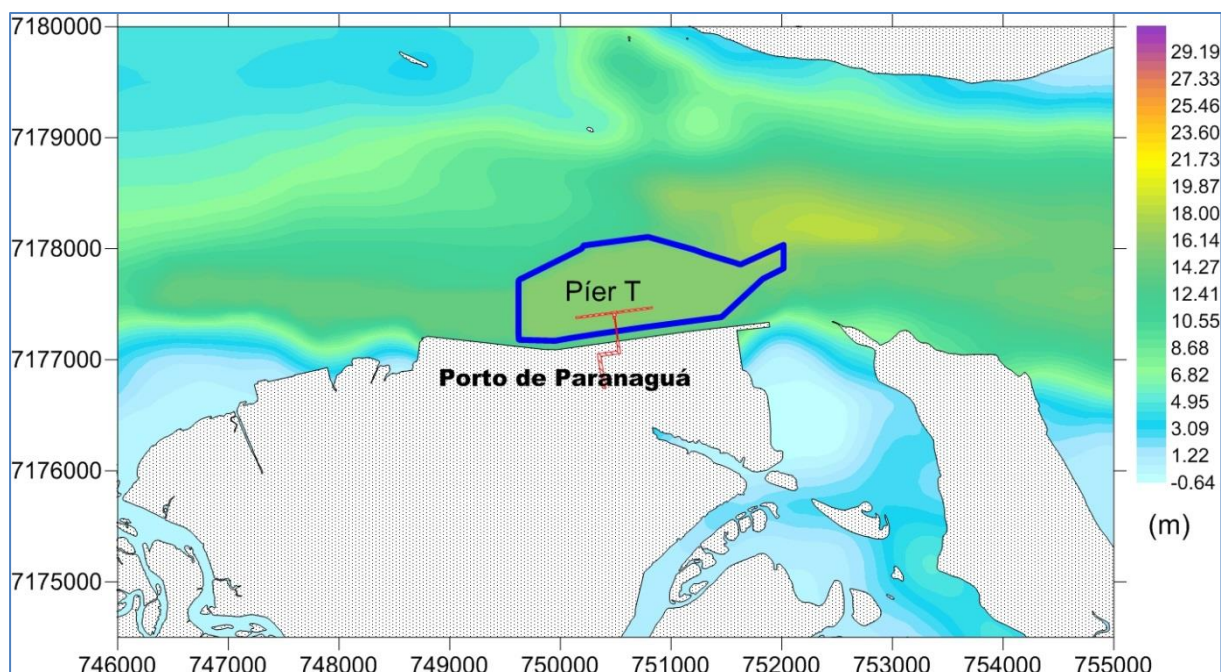
Conforme o exposto acima deverá ocorrer quatro alterações sucessivas de batimetria, cada uma considerando uma das áreas de dragagem e estrutura. Considerando a necessidade de se avaliar cenários típicos de inverno e verão, serão simulados e analisados um total de 8 cenários de prognóstico (totalizando 10 cenários, se somados os 2 de diagnóstico). Estes cenários, de acordo com a estrutura a ser implantada, serão denominados da seguinte forma:

- Prog-T – Verão: considera as características do cenário Diag – Verão mais a alteração de batimetria referente à implantação do píer T e o píer T, em conjunto com as informações relacionadas ao período de verão;
- Prog-T – Inverno: considera as características do cenário Diag – Inverno mais a alteração de batimetria referente à implantação do píer T e o píer T, em conjunto com as informações relacionadas ao período de inverno;
- Prog-F – Verão: considera a batimetria e a estrutura instalada no cenário Prog-T – Verão mais a alteração de batimetria referente à implantação do píer F e o píer F, em conjunto com as informações relacionadas ao período de verão;
- Prog-F – Inverno: considera a batimetria e a estrutura instalada no cenário Prog-T – Inverno mais a alteração de batimetria referente à implantação do píer F e o píer F, em conjunto com as informações relacionadas ao período de inverno;
- Prog-CN – Verão: considera a batimetria e as estruturas instaladas no cenário Prog-F – Verão mais a alteração de batimetria referente à implantação da área do Complexo Náutico e o Complexo Náutico, em conjunto com as informações relacionadas ao período de verão;

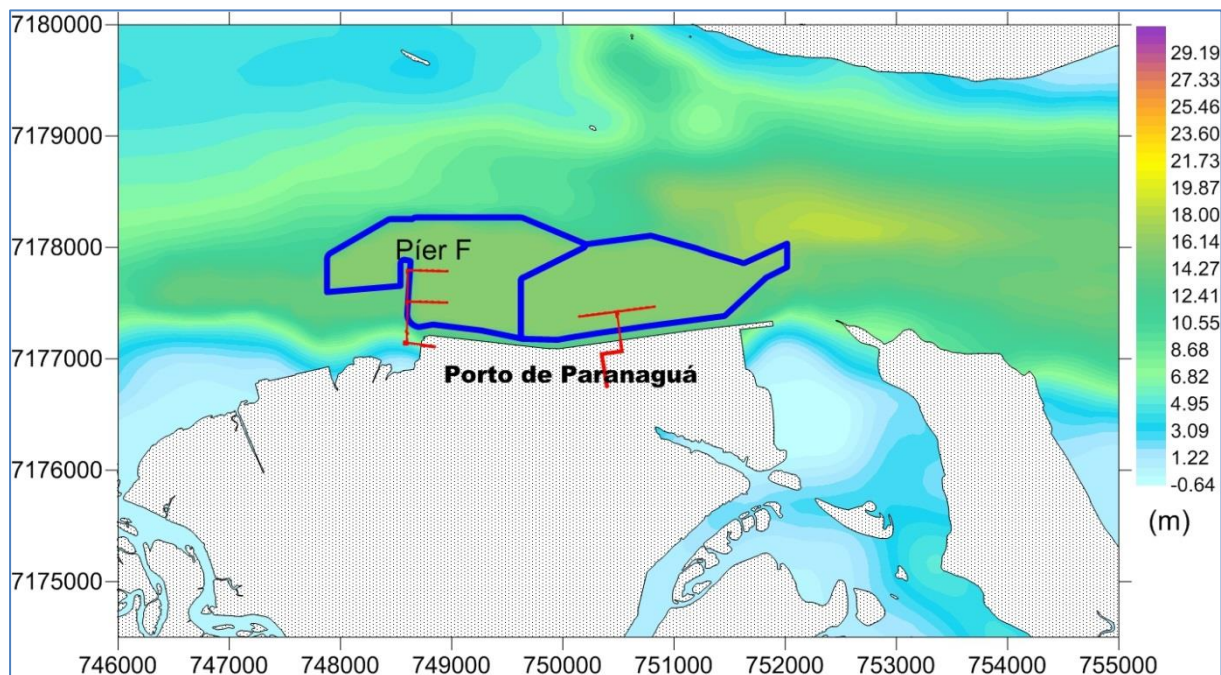
- Prog-CN – Inverno: considera a batimetria e as estruturas instaladas no cenário Prog-F – Inverno mais a alteração de batimetria referente à implantação da área do Complexo Náutico e o Complexo Náutico, em conjunto com as informações relacionadas ao período de inverno;
- Prog-L – Verão: considera a batimetria e as estruturas instaladas no cenário Prog-CN – Verão mais a alteração de batimetria referente à implantação do píer L e o píer L, em conjunto com as informações relacionadas ao período de verão;
- Prog-L – Inverno: considera a batimetria e as estruturas instaladas no cenário Prog-CN – Inverno mais a alteração de batimetria referente à implantação do píer L e o píer L, em conjunto com as informações relacionadas ao período de inverno.

Para a área de maior interesse, as batimetrias utilizadas para os cenários Prog-T, Prog-F, Prog-CN e Prog-L, respectivamente, são apresentadas da Figura 20 até a Figura 23. De acordo com a caracterização do empreendimento, após as dragagens as profundidades nas áreas referentes a cada estrutura deverão ser as seguintes (informações mais detalhadas sobre as dragagens serão apresentadas na seção 1.3.6):

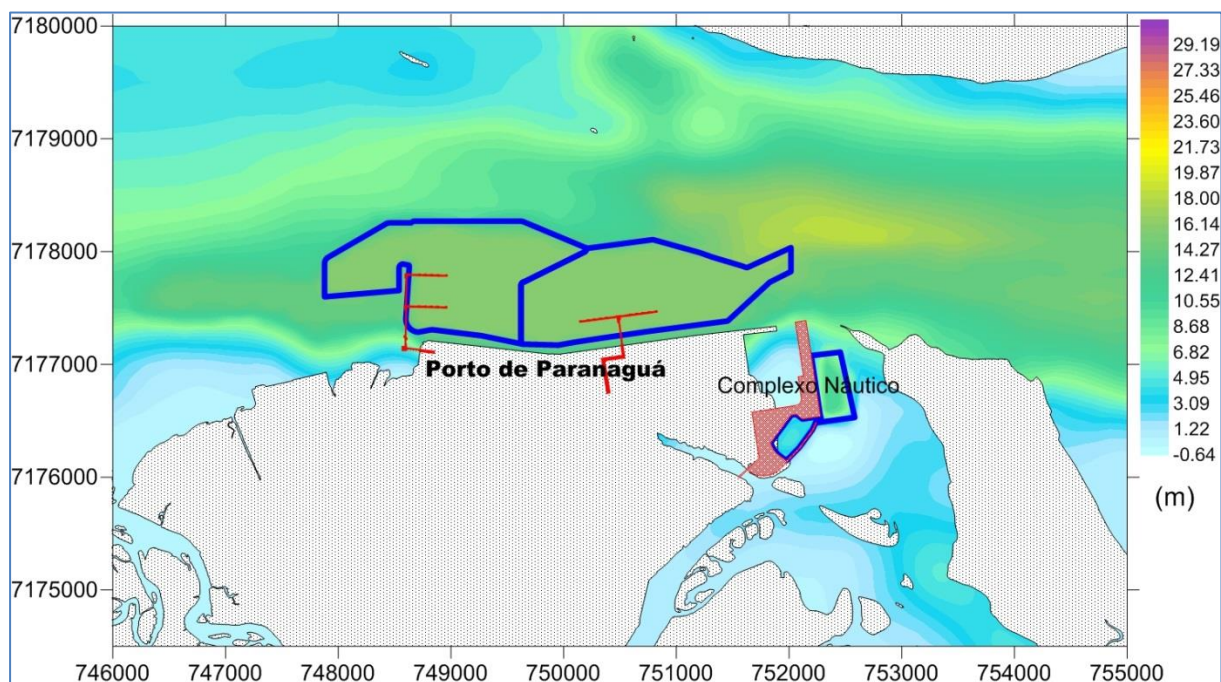
- Pier T: -16,0 m (DHN);
- Pier F: -16,0 m (DHN);
- Complexo Náutico: -10,5 m (DHN) na área do terminal de passageiros e de -5,0 m (DHN) na área da marina;
- Píer L: -16,0 m (DHN).



**Figura 20 – Batimetria na área de interesse – Cenário Prog T. Em azul, área com alteração de batimetria em relação à situação atual.**

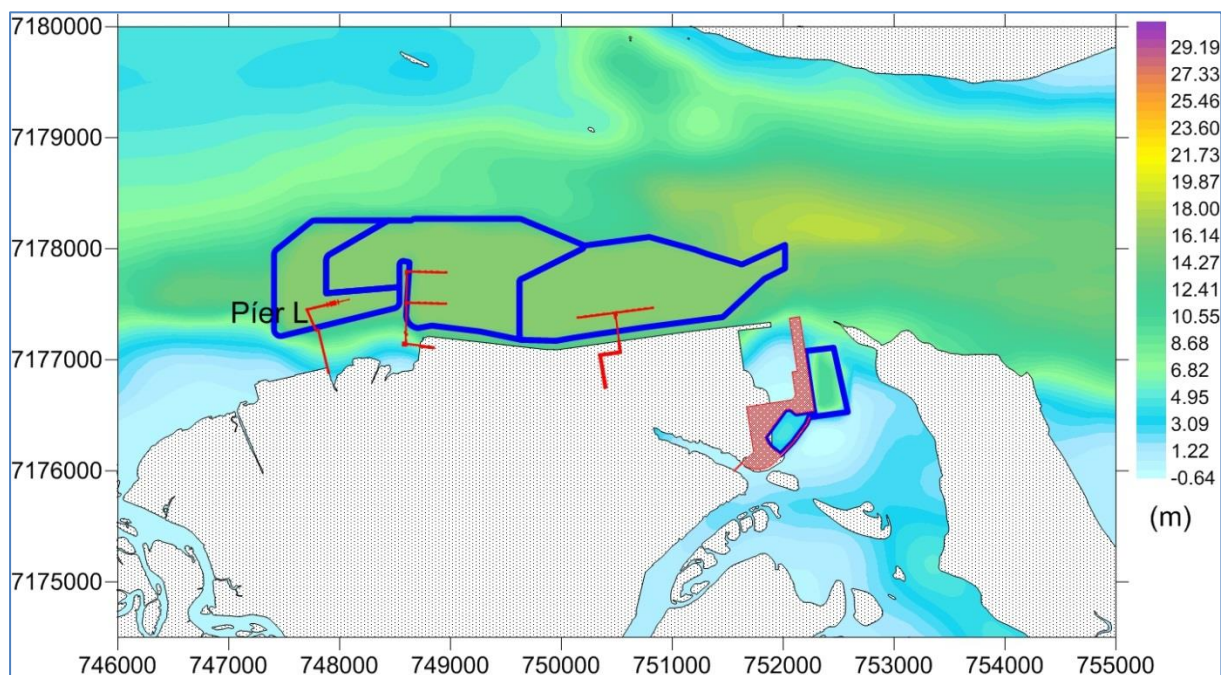


**Figura 21 – Batimetria na área de interesse – Cenário Prog F. Em azul, área com alteração de batimetria em relação à situação atual.**



**Figura 22 – Batimetria na área de interesse – Cenário Prog CN. Em azul, área com alteração de batimetria em relação à situação atual.**







**Figura 23 – Batimetria na área de interesse – Cenário Prog L. Em azul, área com alteração de batimetria em relação à situação atual.**

Nas simulações da hidrodinâmica as estruturas são impostas na forma de tensões decorrentes das forças de arraste e obstrução impostas ao escoamento. No caso de pilares (caso das estruturas submersas que irão compor a base de sustentação dos píeres), é necessário fornecer ao modelo a quantidade de estruturas, sua área de obstrução ao escoamento (área transversal ao escoamento e altura submersa), associadas ao ponto de cálculo, além de sua área de influência. Nesse contexto, de acordo com informações fornecidas pelo empreendedor, e com aproximações necessárias para fins de modelagens, foi considerado o que se segue:

- Píer T: total de 326 pilares (estacas), com diâmetro aproximado de 1,0 m e altura submersa de 16,0 m, distribuídos entre pontes, plataformas e berços de atracação;
- Píer F: total de 540 pilares, com diâmetro aproximado de 1,0 m e altura submersa de 16,0 m, distribuídos entre pontes, plataformas e berços de atracação;
- Píer L: total de 186 pilares, com diâmetro aproximado de 0,8 m e altura submersa de 16,0 m, distribuídos entre ponte e berço de atracação.

Além da batimetria e da caracterização das estruturas, as informações necessários para a implementação do modelo compreendem vazões afluentes através dos rios, vazões sólidas, intensidade e direção do vento, sedimentos de fundo, constantes de maré (obtidas a partir do

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:  49
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	

processo de calibração), e grade numérica – todas já apresentadas na seção 1.3.1, que trata dos dados básicos necessários para as modelagens.

### 1.3.5 Implementação das simulações de geração de onda

Para a implementação do modelo de geração de ondas, além da grade numérica e da batimetria, são necessários dados de velocidade/intensidade, direção do vento, e duração do vento para os períodos que se deseja simular.

Em relação à duração do vento, abaixo é apresentada uma análise das séries de vento para os períodos de Verão e Inverno. Para tanto, define-se a duração média do vento como o período de tempo que o vento de mesma velocidade persiste numa mesma direção. A fim de obter o vento mais frequente (em uma escala temporal), os dados de cada período (Verão e Inverno) foram separados em frequência horária. A Figura 24 e a Figura 25 apresentam a rosa dos ventos com velocidade e direção distribuídas por hora para Verão e Inverno, respectivamente, além de um zoom para o período de 10 horas. Para o período de Verão (Figura 24), o vento mais frequente e que persistiu por mais tempo está entre 2,0 a 3,0 m/s (dado pela escala na cor vermelha). No Inverno (Figura 25), os ventos mais frequentes também são maiores do que 2,0 m/s (cor vermelha). A persistência dos ventos mais frequentes (com velocidade maior do que 2,0 m/s) foi analisada utilizando uma distribuição percentual. Para isso, o número de ocorrência de ventos mais frequentes consecutivos são distribuídos em classes, cujos intervalos vão de 1 até 6 horas, em que, para cada classe, é atribuído um número de ocorrências de ventos consecutivos mais frequentes. Fazendo relação com o total de dados analisados, são obtidos os percentuais e pode-se fazer uma distribuição acumulada. Para o Verão, as distribuições são colocadas na Figura 26, ventos de intensidade de mesma intensidade, não consecutivos, são retirados da análise. É possível observar que, até o intervalo de 5h30min, há crescimento da curva acumulada. Depois desse tempo, não se observa a mesma taxa de crescimento, podendo-se considerar estabilidade. Isso indica que o intervalo de 5h30min é a duração do vento para a série de Verão. Da mesma forma, na Figura 27 são observadas as distribuições para o Inverno – nesse caso, a curva acumulada se estabiliza a partir do intervalo de 3h30min. Dessa forma, conclui-se que, para o Inverno, a duração do vento, é de 3h30min.

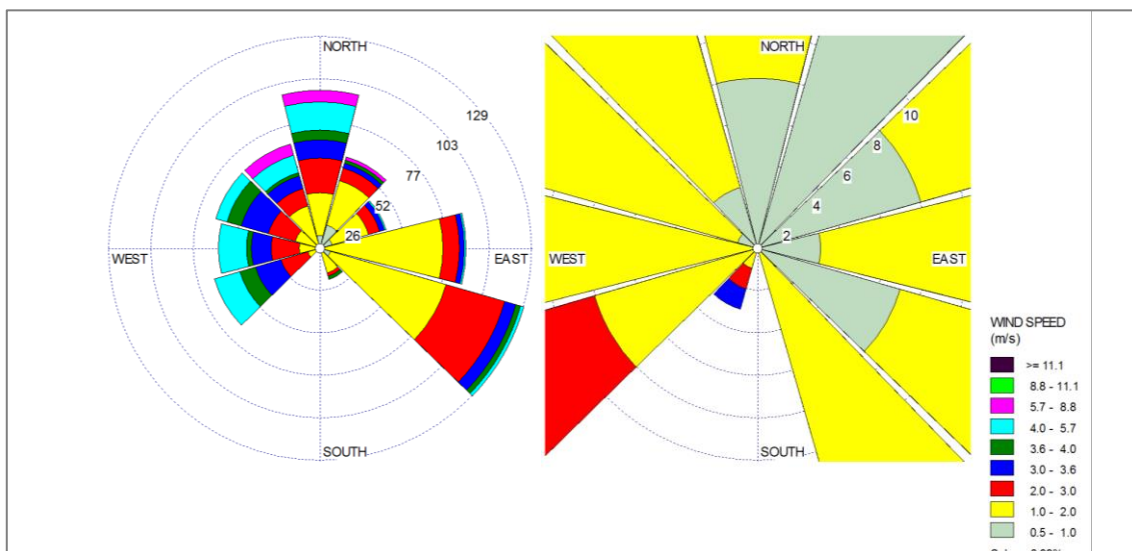


Figura 24 – Rosa dos ventos. A direção do vento é distribuída por horas e as velocidades são dadas pela escala de cores. – Verão.

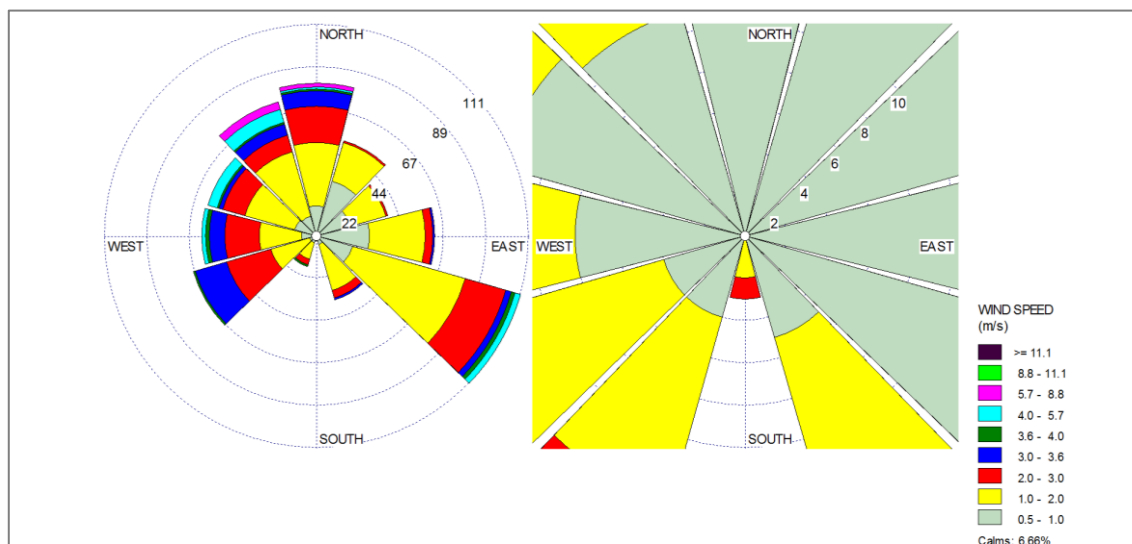
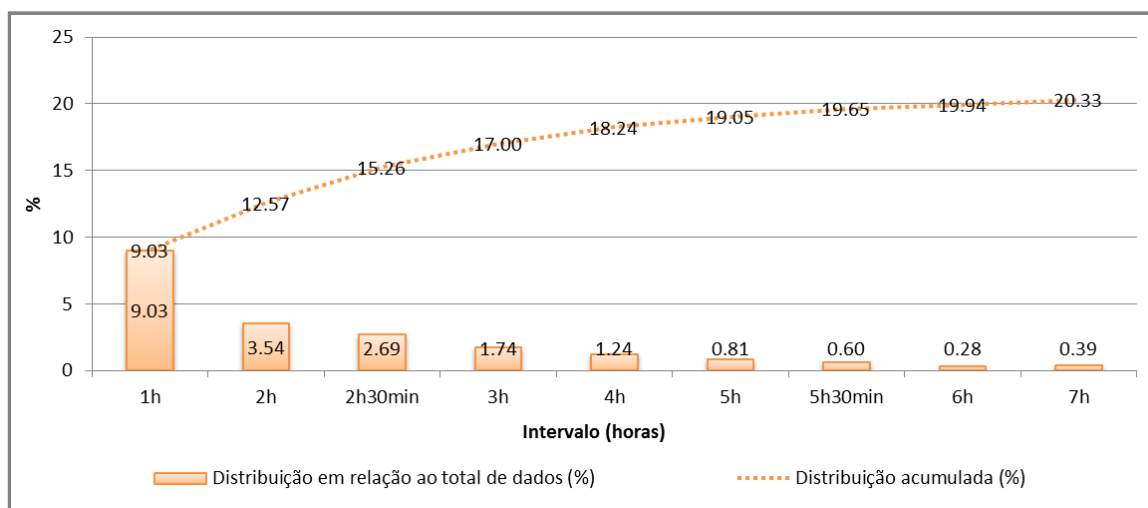
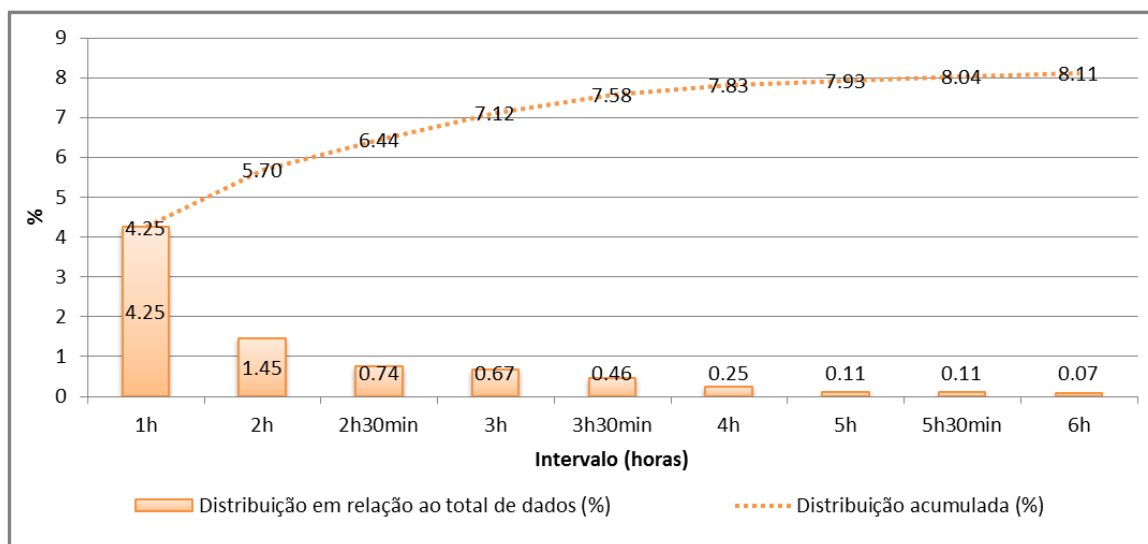


Figura 25 – Rosa dos ventos. A direção do vento é distribuída por horas e as velocidades são dadas pela escala de cores. – Inverno.



**Figura 26 – Percentuais de valores consecutivos de velocidade de vento acima de 2,0 m/s sobre a quantidade total de dados. – Verão.**





**Figura 27 - Percentuais de valores consecutivos de velocidade de vento acima de 2,0 m/s sobre a quantidade total de dados. – Inverno.**

Para geração de ondas, são considerados os seguintes cenários de simulação:

- Diag-Verão: com características semelhantes ao cenário Diag-Verão descrito na seção 1.3.4, com duração do vento de 5h30min;
- Diag-Inverno: com características semelhantes ao cenário Diag-Inverno descrito na seção 1.3.1.4, com duração do vento de 3h30min;
- Prog-Verão: com características semelhantes ao cenário Prog-L - Verão descrito na seção 1.3.4, com duração do vento de 5h30min;
- Prog-Inverno: com características semelhantes ao cenário Prog-L - Inverno descrito na seção 1.3.4, com duração do vento de 5h30min.





 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	52

### 1.3.6 Implementação das simulações de dragagem

Como já mencionado, para a implantação de cada estrutura está prevista dragagem de uma determinada área. Estas foram apresentadas na Figura 19 (e seguintes, onde são apresentadas as alterações de batimetria para cada cenário). Como mencionado anteriormente, estão previstos aprofundamentos até -16,0 m (DHN) para as áreas de dragagem dos píeres T, F e L; no Complexo Náutico está previsto aprofundamento até -10,5 m (DHN) na área do terminal de passageiros e até -5,0 m (DHN) na área da marina. Conforme informações do empreendedor e da caracterização do empreendimento, nas operações de dragagem serão utilizadas duas dragas do tipo *Hopper* – embarcações autopropelidas com sistema próprio de armazenamento de material dragado (cisternas); as dragas utilizadas terão capacidade de 2500 m<sup>3</sup> e de 10000 m<sup>3</sup> – a primeira será utilizada na área da marina do Complexo Náutico, e a segunda nas áreas dos píeres e do terminal de passageiros.

Para as simulações, as informações utilizadas foram fornecidas pelo empreendedor ou estimadas com base em informações fornecidas pelo mesmo. Desta forma, para fins de modelagem, considerou-se o que se segue:



- As dragas irão operar continuamente, durante 24 horas;
- Estima-se que um ciclo de dragagem completo irá durar 8 horas, sendo: 1 hora de operação (dragagem do material do fundo), 3 horas de viagem até a área de descarte do material (conforme caracterização do empreendimento, distante cerca de 50 km), 1 hora para o processo de descarte do material, mais 3 horas para retorno ao local de operação;
- Considera-se que o sedimento dragado será composto, aproximadamente, por 80% de solo e 20% de água;
- Do total de solo dragado, estima-se que 30% sejam sedimentos finos (que podem ficar suspensos). Destes 30%, estima-se que 30% são devolvidos à coluna d'água por meio do extravasamento da cisterna (processo também conhecido como *overflow*), e que 3% ficarão suspensos na coluna d'água devido ao processo de sucção/desagregação do material de fundo – os sedimentos finos suspensos na coluna d'água correspondem à vazão de sedimentos da fonte de dragagem, ou seja, são eles que formarão a pluma de sedimentos suspensos;

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	53

- Considera-se que a vazão de sedimentos finos relacionada ao processo de sucção/desagregação do material de fundo irá ocorrer durante toda a hora de operação da draga;
- Considera-se que o processo de *overflow* ocorre durante os 15 minutos finais da hora de operação da draga – é importante observar que as vazões de sedimentos suspensos devido ao *overflow* será muito maior quando comparada às vazões de finos do processo de sucção;
- As vazões das fontes de dragagem são definidas de acordo com os volumes de solo dragados em cada fonte, com a capacidade da draga, e com o tempo de operação da draga (definido aqui como sendo de 1 hora independente do tamanho da fonte, porém respeitando a capacidade da draga). O volume de dragagem de cada fonte é definido a partir da diferença entre as cotas de fundo das batimetrias atual e pós-dragagem. Assim, a vazão de cada fonte de dragagem será variável; da mesma forma, o tamanho da área superficial da fonte de dragagem também é variável;
- Eventuais paradas da operação da draga para manutenção, abastecimento, ou mau tempo são desconsideradas nas simulações. Considera-se que a troca de tripulação é realizada durante o processo de operação da draga.

Considerando o exposto acima e a ordem de implantação das estruturas, são definidos os cenários de dragagem. Da mesma forma que para as simulações da hidrodinâmica e da evolução morfológica de fundo, são consideradas situações de Inverno e de Verão (idênticas às anteriores). Assim, são simulados um total de 8 cenários de dragagem, denominados da seguinte forma:

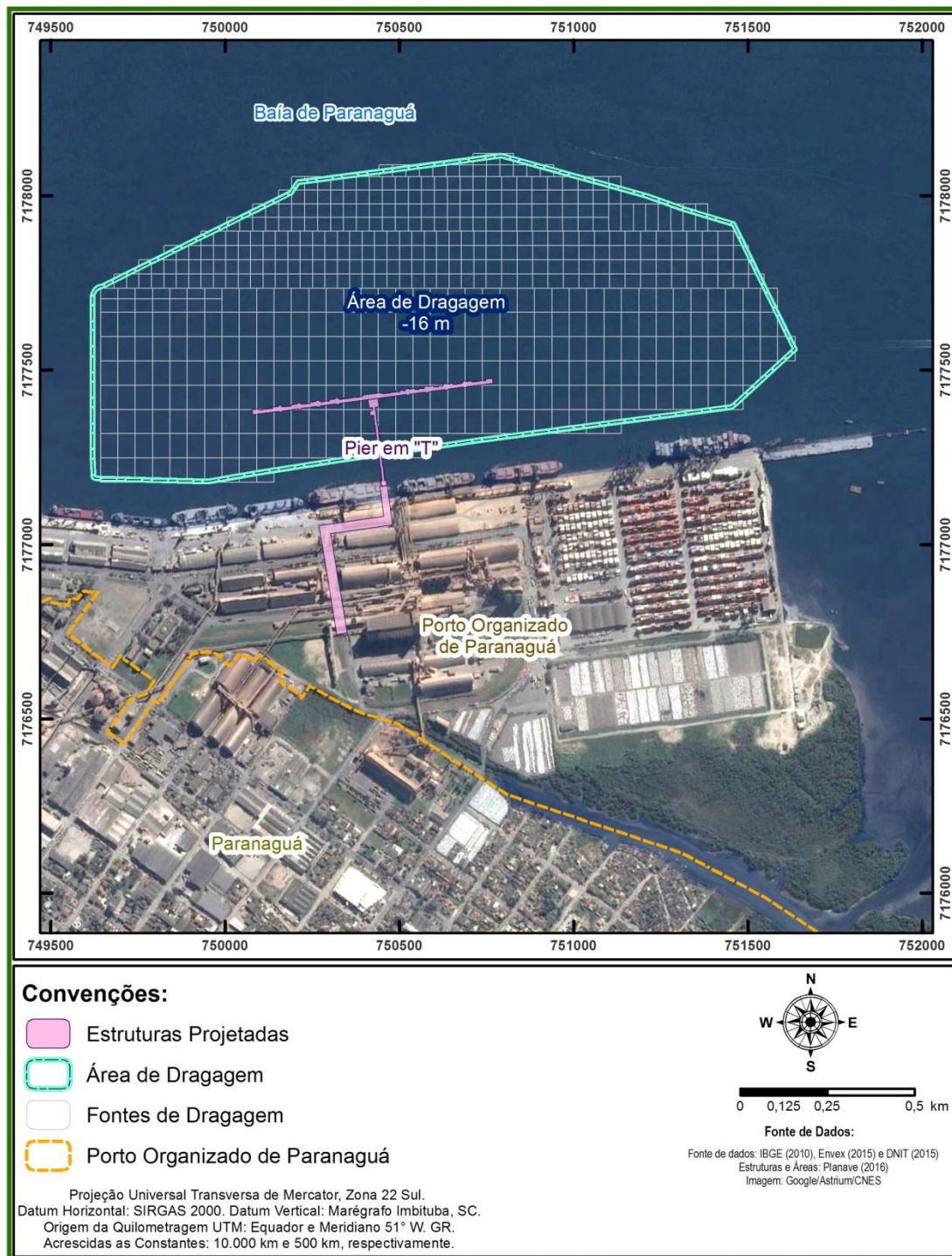
- Drag-T – Verão: considera a dragagem na área de implantação do Píer T, com condições de Verão. É composto por um total de 573 fontes, o que corresponde a 191 dias de operação ininterrupta da draga com capacidade de 10.000 m<sup>3</sup>;
- Drag-T – Inverno: considera a dragagem na área de implantação do Píer T, com condições de Inverno. É composto por um total de 573 fontes, o que corresponde a 191 dias de operação ininterrupta da draga com capacidade de 10.000 m<sup>3</sup>;
- Drag-F – Verão: considera a dragagem na área de implantação do Píer F, com condições de Verão. É composto por um total de 900 fontes, o que corresponde a 300 dias de operação ininterrupta da draga com capacidade de 10.000 m<sup>3</sup>;
- Drag-F – Inverno: considera a dragagem na área de implantação do Píer F, com condições de Inverno. É composto por um total de 900 fontes, o que

 Estudos e Projetos de Engenharia	 ADMINISTRAÇÃO DOS PORTOS DE PARANAGUÁ E VITÓRIA	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
		Nº PLANAVE	REV. PLANAVE	
		RL-B00-H01-1001	0	54

corresponde a 300 dias de operação ininterrupta da draga com capacidade de 10.000 m<sup>3</sup>;

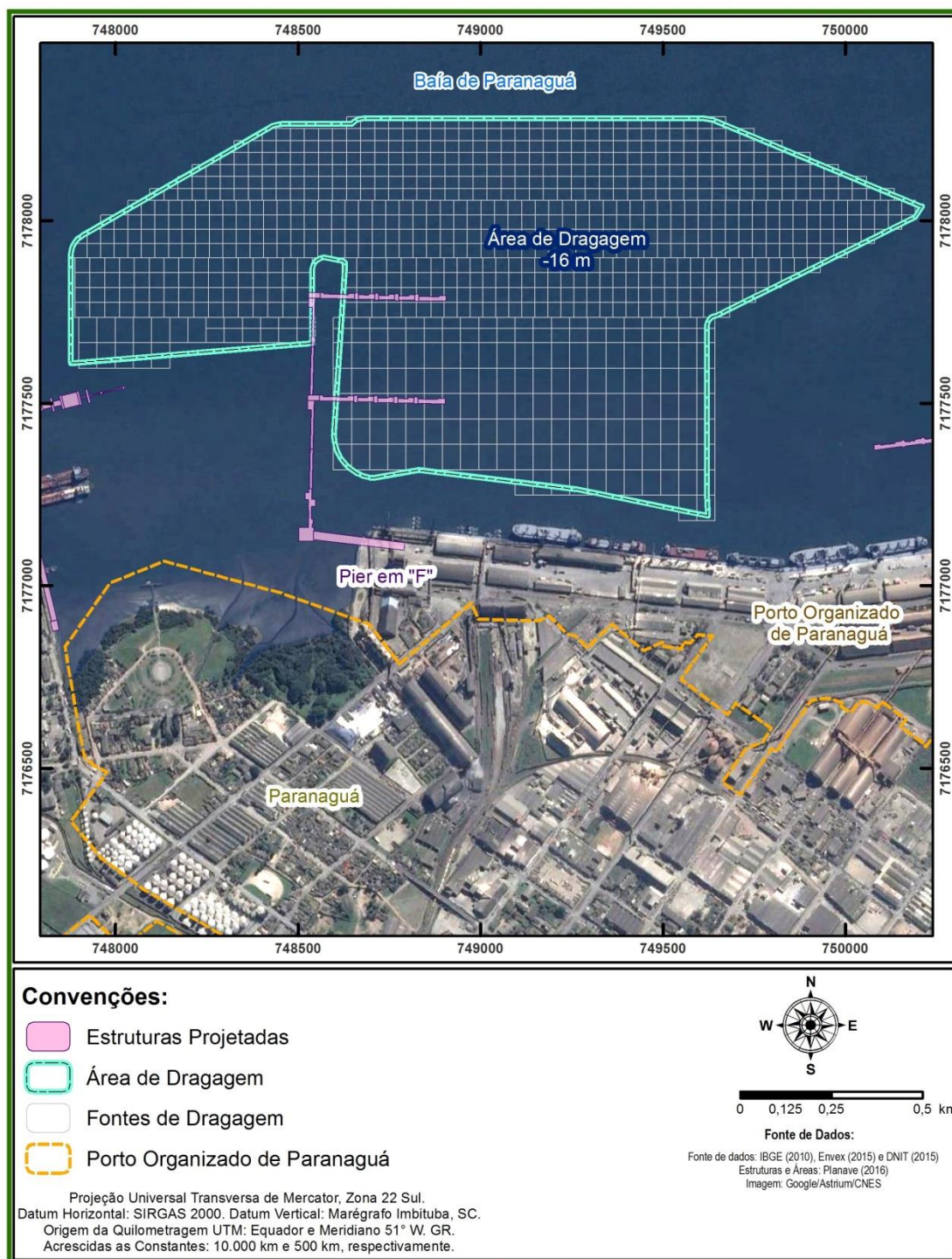
- Drag-CN – Verão: considera a dragagem na área de implantação do Complexo Náutico, com condições de Verão. A área do terminal de passageiros é composta por um total de 239 fontes, o que corresponde a 80 dias de operação ininterrupta da draga com capacidade de 10.000 m<sup>3</sup>. A área da marina é composta por 216 fontes, o que corresponde a 152 dias de operação ininterrupta da draga com capacidade de 2.500 m<sup>3</sup> – assim, totaliza-se um total de 232 dias de trabalho;
- Drag-CN – Inverno: considera a dragagem na área de implantação do Complexo Náutico, com condições de Inverno. A área do terminal de passageiros é composta por um total de 239 fontes, o que corresponde a 80 dias de operação ininterrupta da draga com capacidade de 10.000 m<sup>3</sup>. A área da marina é composta por 216 fontes, o que corresponde a 152 dias de operação ininterrupta da draga com capacidade de 2.500 m<sup>3</sup> – assim, totaliza-se um total de 232 dias de trabalho;
- Drag-L – Verão: considera a dragagem na área de implantação do Píer L, com condições de Verão. É composto por um total de 346 fontes, o que corresponde a 116 dias de operação ininterrupta da draga com capacidade de 10.000 m<sup>3</sup>;
- Drag-L – Inverno: considera a dragagem na área de implantação do Píer L, com condições de Inverno. É composto por um total de 346 fontes, o que corresponde a 116 dias de operação ininterrupta da draga com capacidade de 10.000 m<sup>3</sup>.

A Figura 28 até a Figura 31 mostram a distribuição das fontes de dragagem das áreas referentes a cada um dos empreendimentos – nessas figuras, cada quadrilátero representa uma fonte de dragagem. A área superficial de cada fonte multiplicada pela diferença entre as profundidades atual e futura representa o volume de solo retirado (dragado) desse local. Cada fonte possui uma vazão de sedimentos finos referente ao processo de sucção/desagregação do material de fundo e uma referente ao processo de *overflow*.

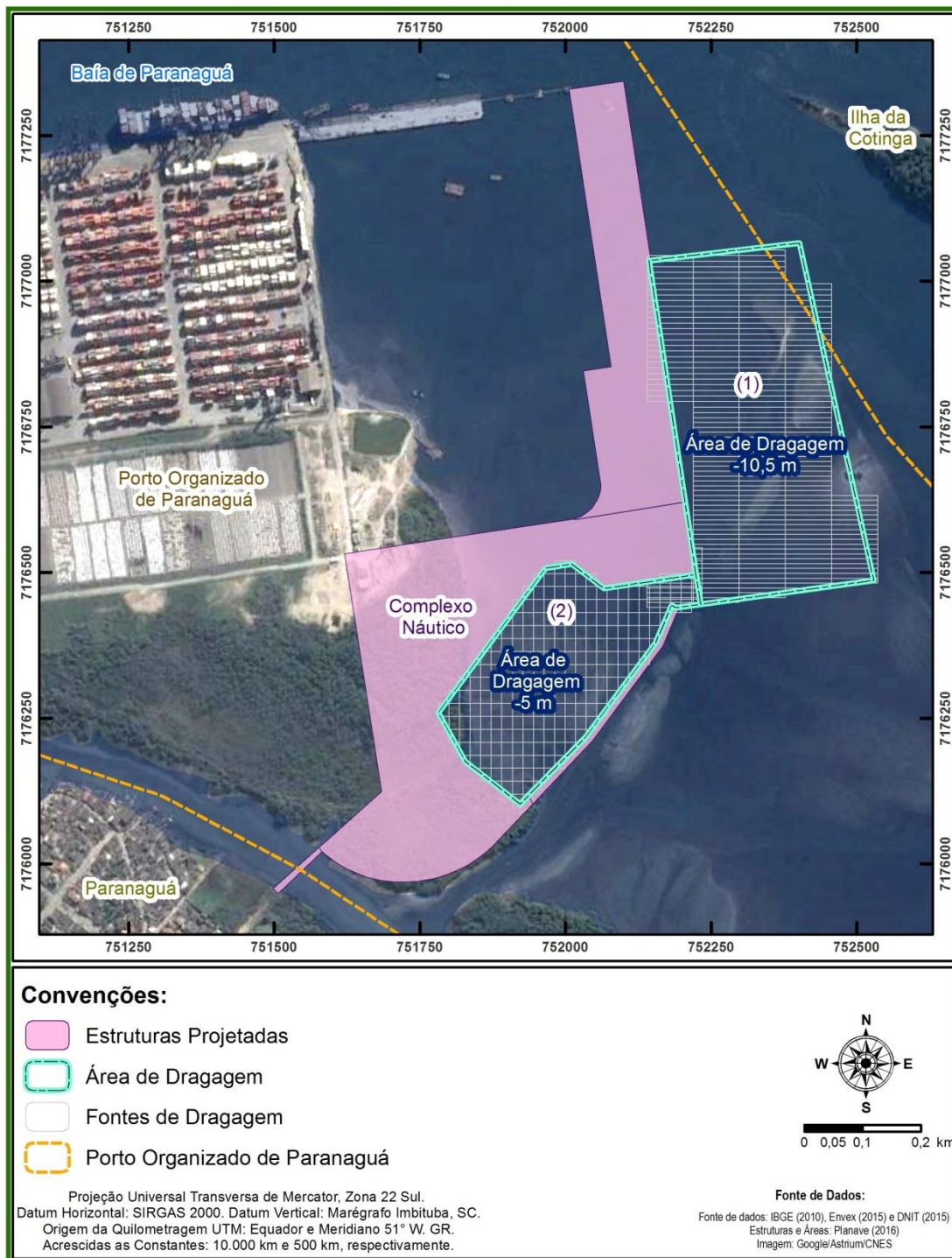


**Figura 28 – Distribuição das fontes de dragagem – Cenário Drag-T.**



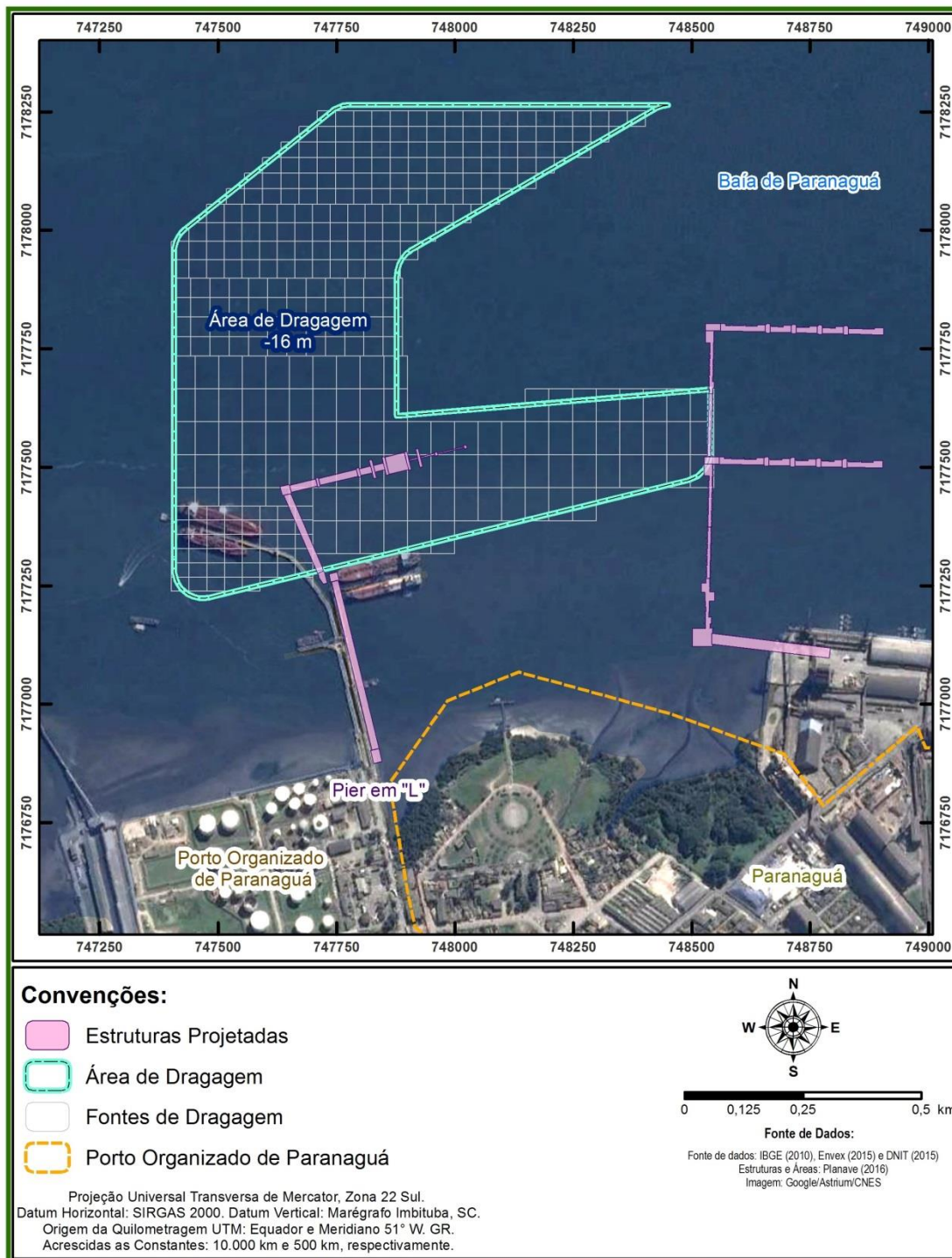


**Figura 29 – Distribuição das fontes de dragagem – Cenário Drag-F.**





**Figura 30 – Distribuição das fontes de dragagem – Cenário Drag-CN.**





**Figura 31 – Distribuição das fontes de dragagem – Cenário Drag-L.**

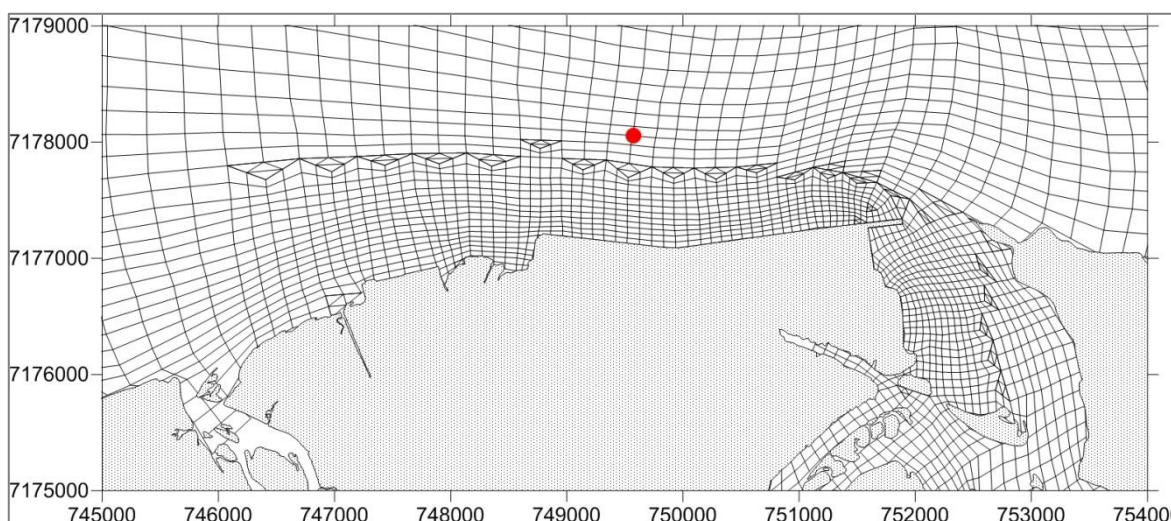


 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	59

## 1.4 Resultados do Modelo Hidrodinâmico

Neste item são apresentados os resultados das simulações de hidrodinâmica. Os resultados são apresentados os diversos cenários, em situações de Verão e Inverno, o que permite avaliar o efeito da sazonalidade sobre a hidrodinâmica da região de interesse do estudo.

Os resultados são apresentados por meio de figuras que mostram variações temporais de elevação, do módulo da velocidade de corrente e da tensão no fundo no ponto de referência destacado na Figura 32.



**Figura 32 – Localização do ponto de referência para o qual serão apresentadas as séries temporais.**

Distribuições espaciais instantâneas (“fotos” momentâneas da área de interesse) e probabilidades de ocorrência de determinadas velocidades de corrente (maiores do que 0,1 m/s e menores do que 0,01 m/s) são apresentadas para tempos de simulação que representam situações de sizígia e quadratura em momentos de preamar, baixamar, meia-maré vazante e meia-maré enchente – estes períodos foram definidos com base nas séries temporais de elevação para cada cenário. Para melhor compreensão, a Figura 33 mostra, com base em uma série de elevação de marés, exemplos de ocorrência de preamar (máxima amplitude de elevação), baixamar (mínima amplitude de elevação), meia-maré enchente (elevação próxima a zero e aumentando) e meia-maré vazante (elevação próxima a zero e diminuindo), além das situações de sizígia (período de maiores variações de amplitude entre preamar e baixamar) e quadratura (período de menores variações de amplitude entre preamar e baixamar).

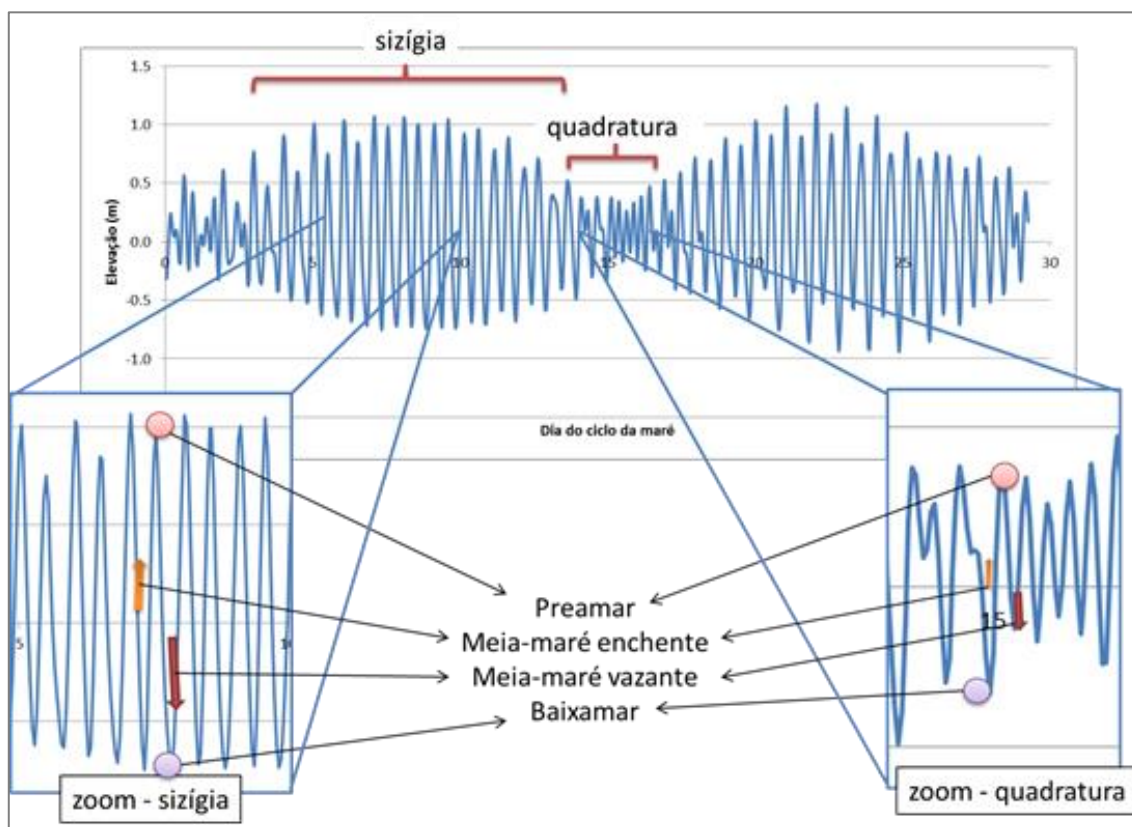
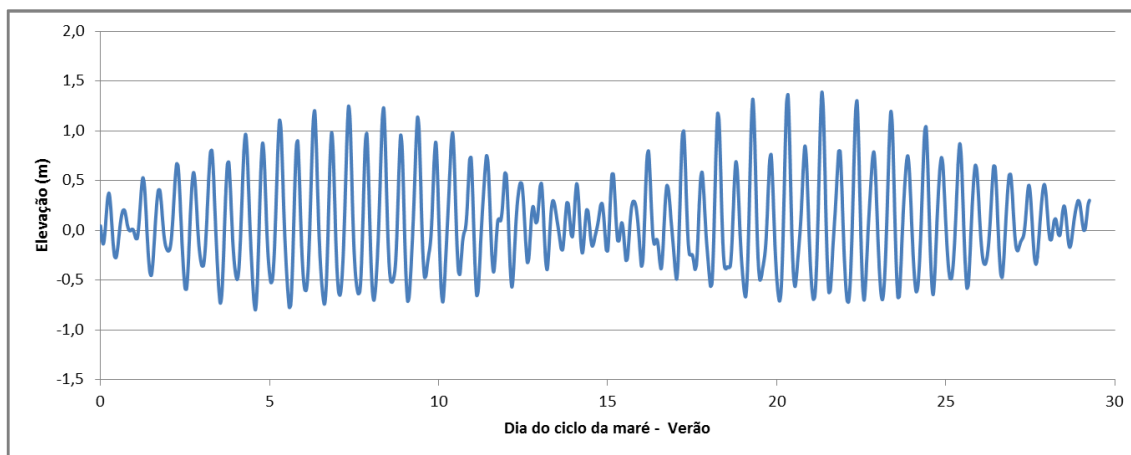


Figura 33 – Exemplo de ciclo de maré.

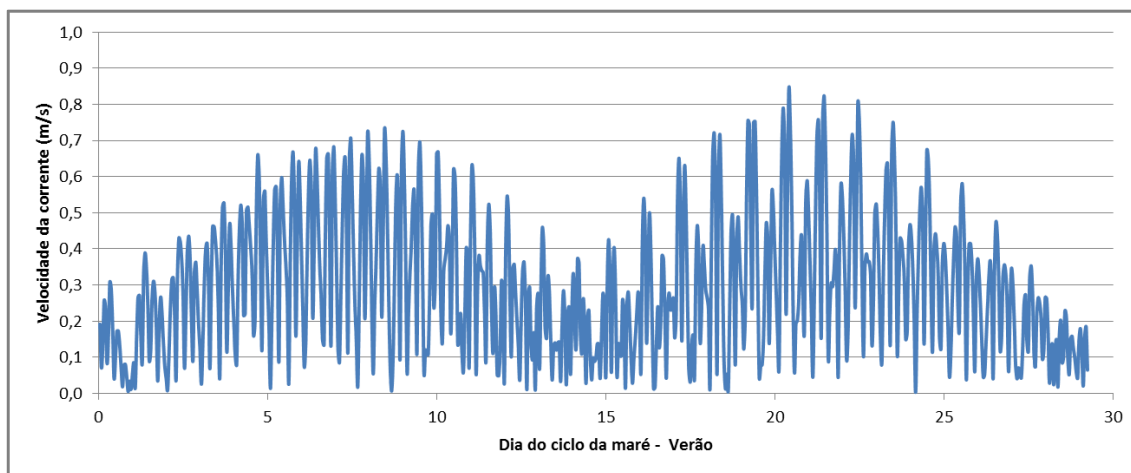
Os resultados para todos os cenários de hidrodinâmica (incluindo diagnóstico e prognóstico) são apresentados na sequência.

#### 1.4.1 Resultados de hidrodinâmica para o Cenário Diag - Verão

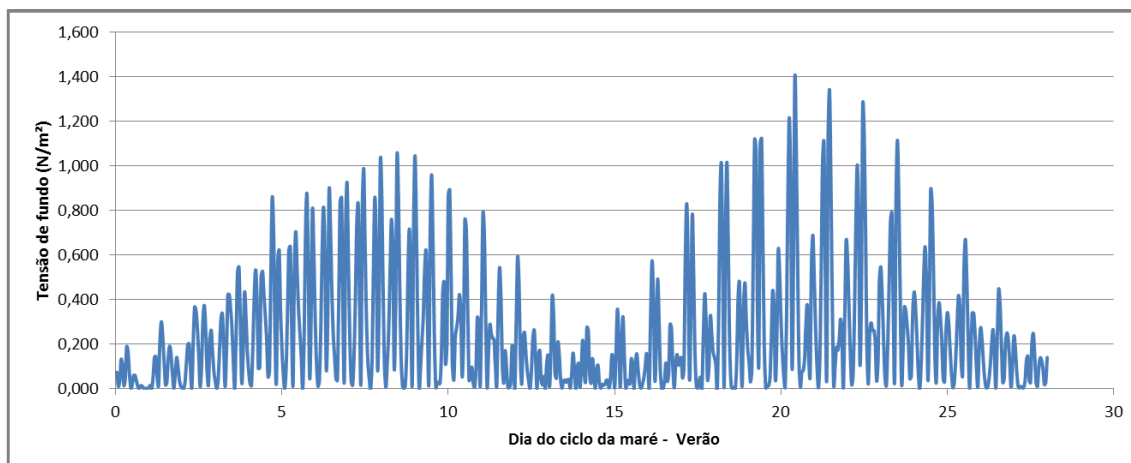
Para o cenário Diag – Verão, a Figura 34 apresenta a evolução temporal de elevação do nível da superfície livre (ou de maré) e a Figura 35 mostra a evolução temporal da velocidade de corrente – ambos para o ponto apresentado na Figura 32. Para a elevação, observa-se que os valores variam entre cerca de -0,8 m e 1,4 m. Já as velocidades de corrente máximas são da ordem de 0,8 m/s. Na Figura 36 tem-se a série temporal do módulo de tensão de fundo cujo valor máximo é de  $1,4 \text{ N/m}^2$  – o módulo de tensão é uma variável importante na análise da evolução morfológica do fundo da baía, em geral, quanto maior seu valor, maior a possibilidade de erosão.



**Figura 34 – Série temporal de elevação – Cenário Diag – Verão.**





**Figura 35 – Série temporal de velocidade de corrente – Cenário Diag – Verão.**



**Figura 36 – Série temporal de tensão no fundo – Cenário Diag – Verão.**

Conforme mencionado acima, com base nas séries de elevação da superfície livre são definidos os períodos para análise das distribuições espaciais. Para este cenário, na Tabela

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	62

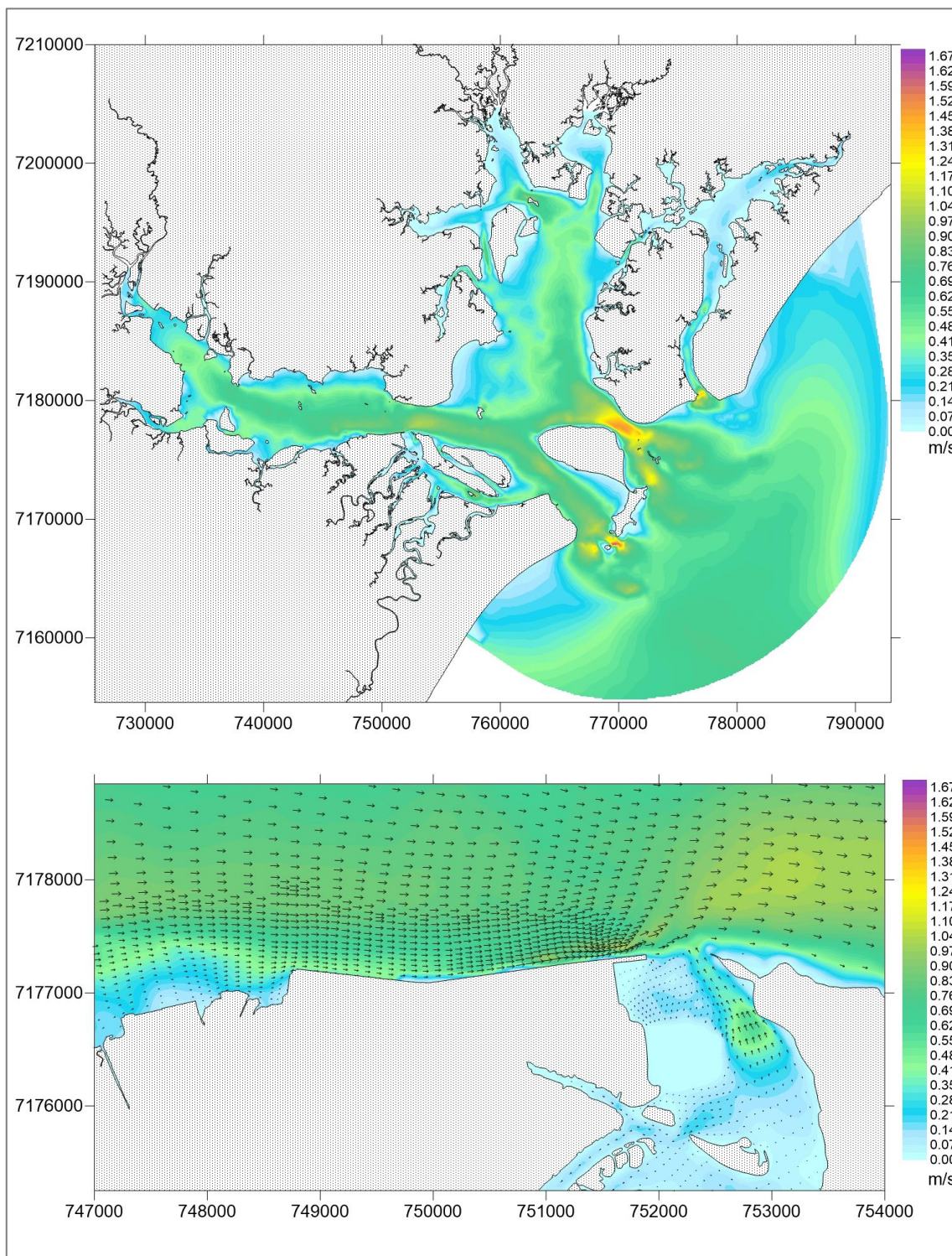
7 são apresentados os resultados (elevação, módulo da velocidade de corrente e tensão no fundo) obtidos para o ponto de referência da Figura 32. As distribuições espaciais das velocidades de corrente para estes períodos são apresentadas da Figura 37 até a Figura 44 – em todas as figuras foi priorizada a visualização da região de maior interesse desse estudo. Os vetores indicam as direções das velocidades de corrente.

Em sizígia, para as situações de meia-maré enchente, meia-maré vazante e preamar as velocidades de corrente chegam a 1,0 m/s; em baixamar, as velocidades estão na ordem de 0,2 m/s. Em quadratura, predominam velocidades abaixo de 0,5 m/s, sendo menores para meia-maré vazante. Considerando toda a baía, as maiores velocidades encontram-se na área da Desembocadura Sul, entre as Ilhas da Galheta e do Mel. Neste local a velocidade chega a ser maior que 1,0 m/s.

**Tabela 7 – Elevação, módulo da velocidade de corrente e tensão no fundo no ponto de referência para os períodos selecionados para análise das distribuições espaciais – Cenário Diag – Verão.**

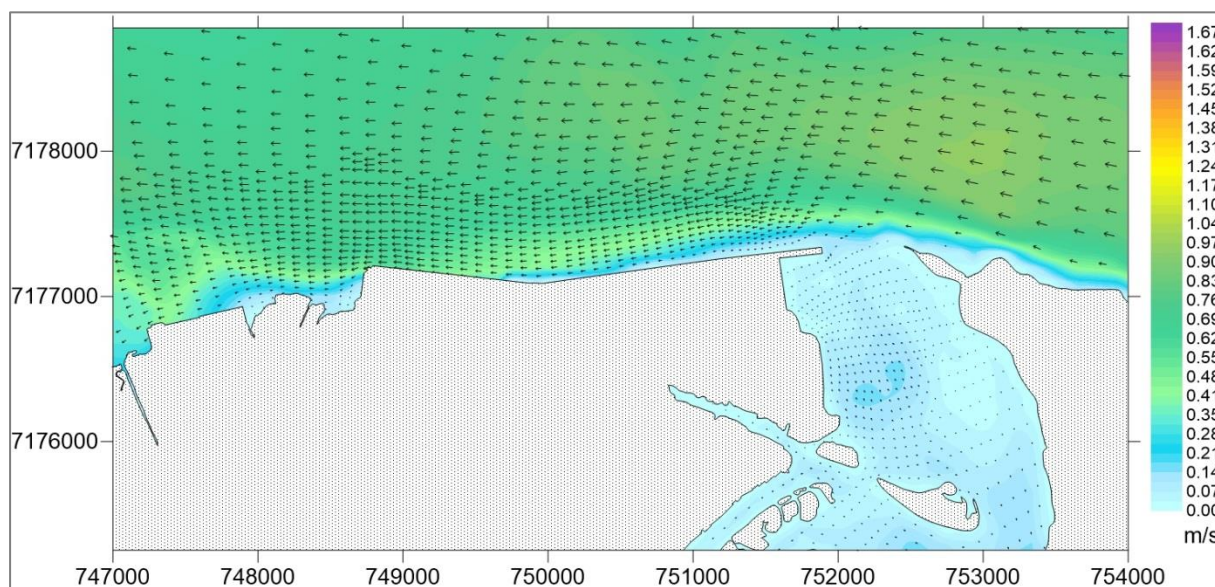
Situação		Dia do ciclo de maré e hora	Elevação (m)	Velocidade de corrente (m/s)	Tensão no fundo (N/m <sup>2</sup> )
Sizígia	Meia-maré enchente	Dia 21 - 22:00	-0,0320	0,5188	0,5333
	Meia-maré vazante	Dia 22 - 04:00	0,1039	0,8235	1,3399
	Preamar	Dia 22 - 01:00	1,3871	0,5103	0,5018
	Baixamar	Dia 21 - 19:00	-0,6945	0,2238	0,1007
Quadratura	Meia-maré enchente	Dia 14 - 17:00	0,0990	0,2269	0,1017
	Meia-maré vazante	Dia 14 - 21:00	0,1207	0,3726	0,2742
	Preamar	Dia 14 - 19:00	0,4687	0,1948	0,0744
	Baixamar	Dia 18 - 16:00	-0,0623	0,0530	0,0056



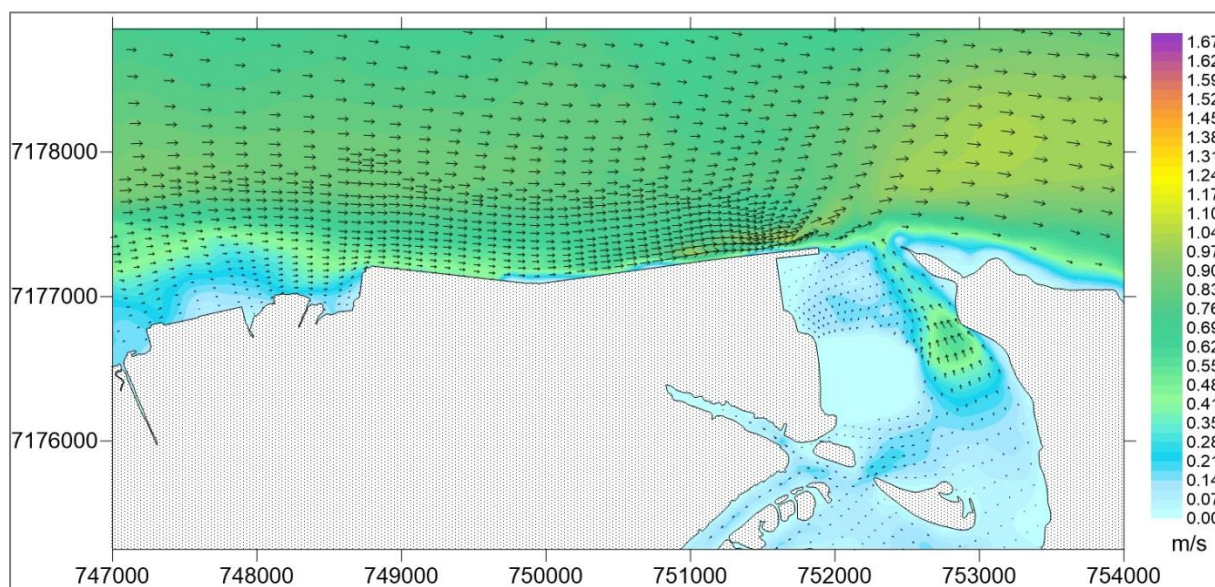


**Figura 37 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de preamar – sizígia – Cenário Diag – Verão. Acima, resultados para toda a baía; abaixo, zoom na área de interesse.**

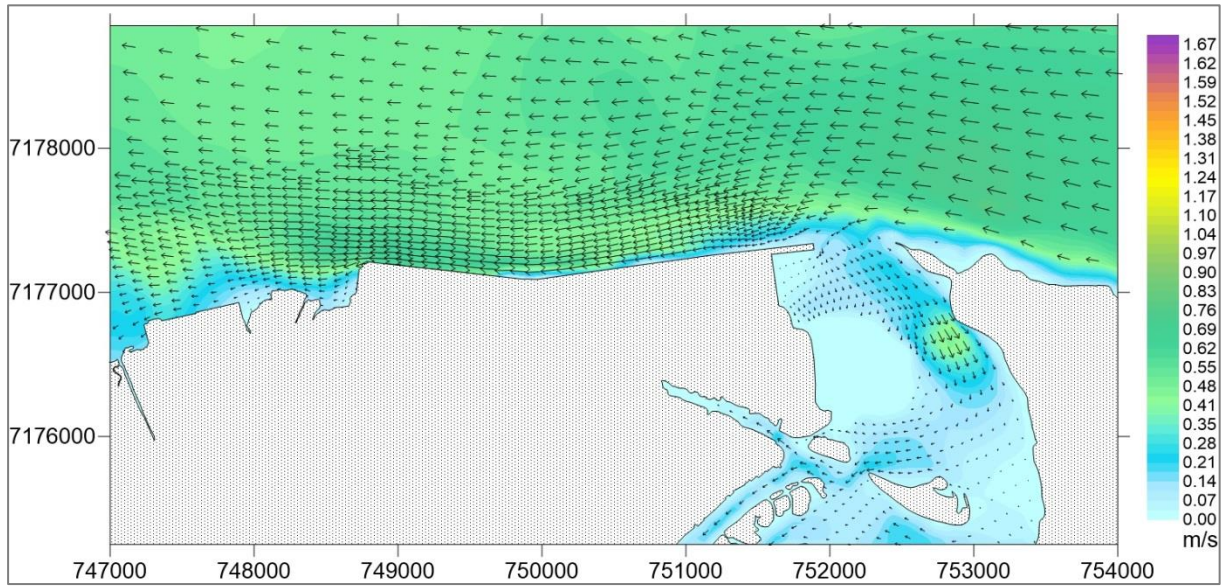




**Figura 38 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de baixamar – sizígia – Cenário Diag – Verão.**

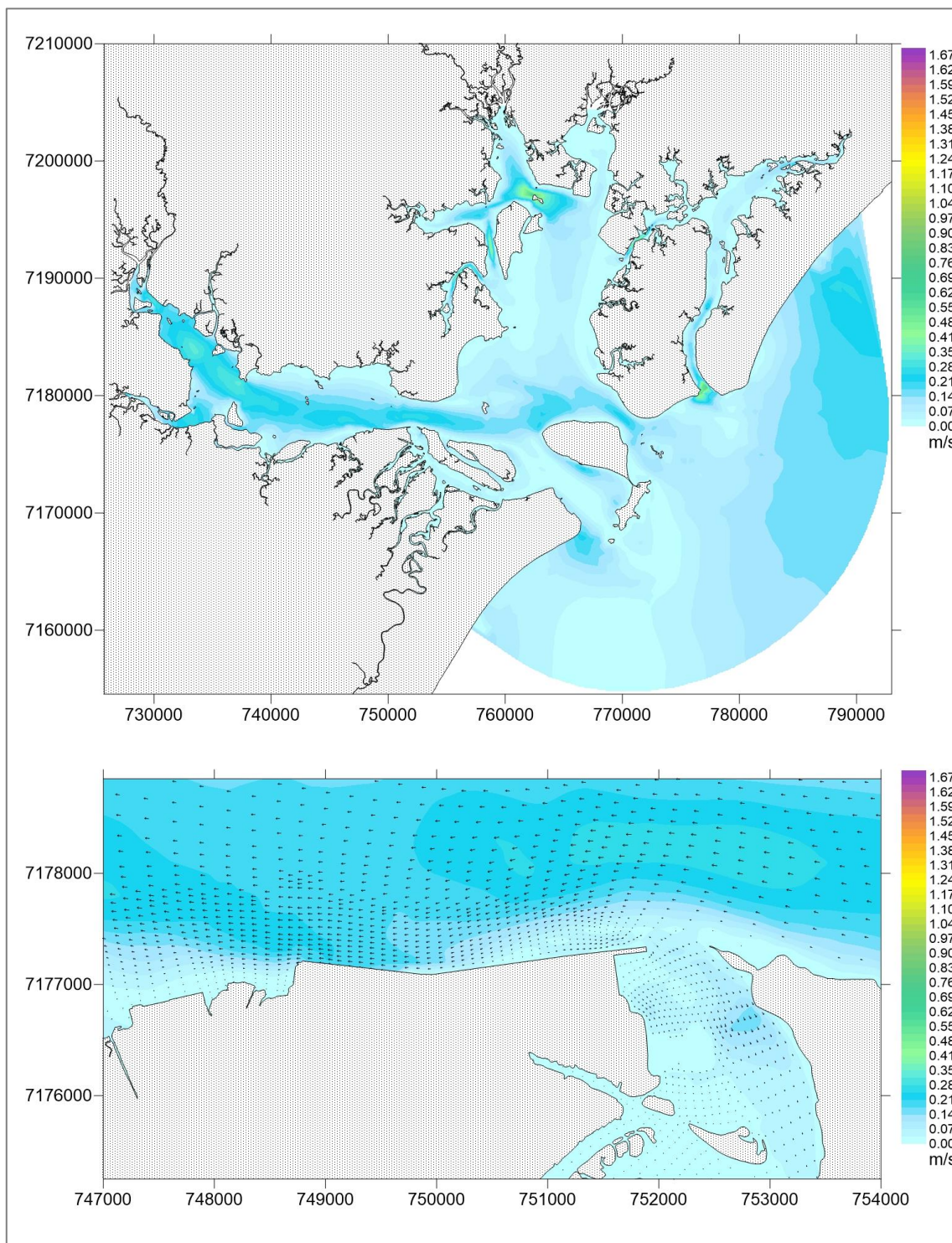


**Figura 39 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré vazante – sizígia – Cenário Diag – Verão.**

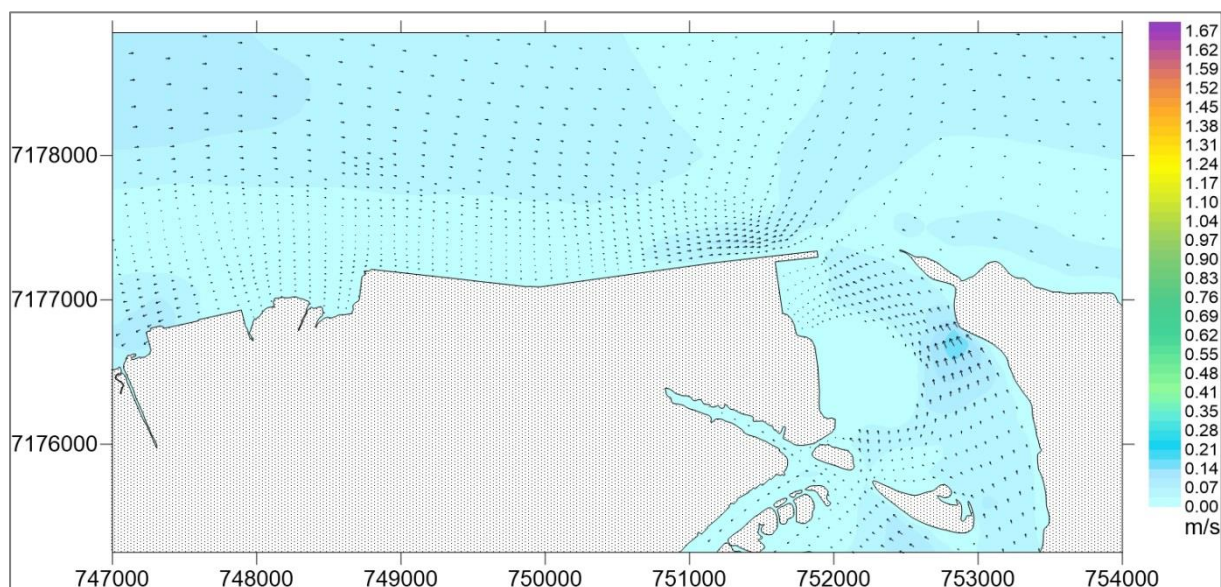


**Figura 40 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré enchente – sizígia – Cenário Diag – Verão.**

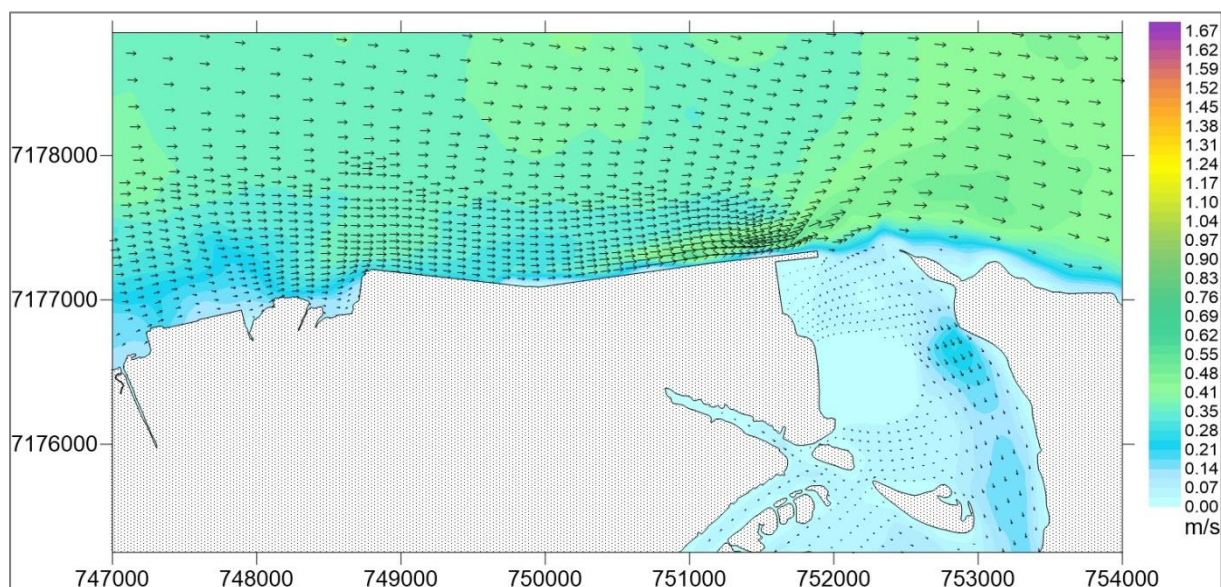




**Figura 41 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de preamar – quadratura – Cenário Diag – Verão. Acima, resultados para toda a baía; abaixo, zoom na área de interesse.**

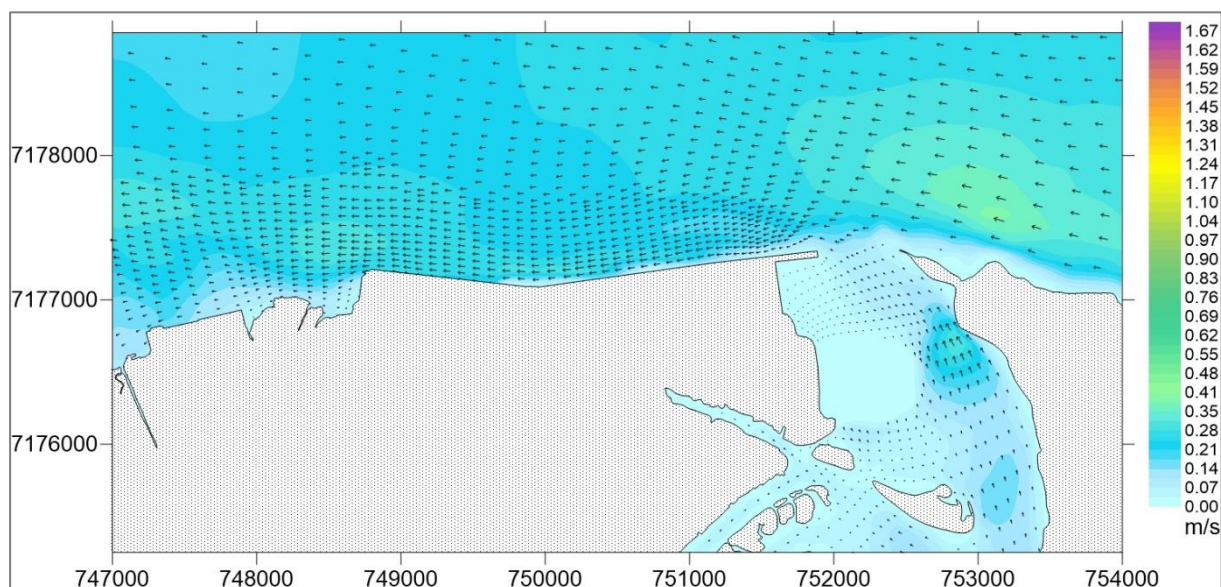


**Figura 42 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de baixamar – quadratura – Cenário Diag – Verão.**



**Figura 43 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré vazante – quadratura – Cenário Diag – Verão.**

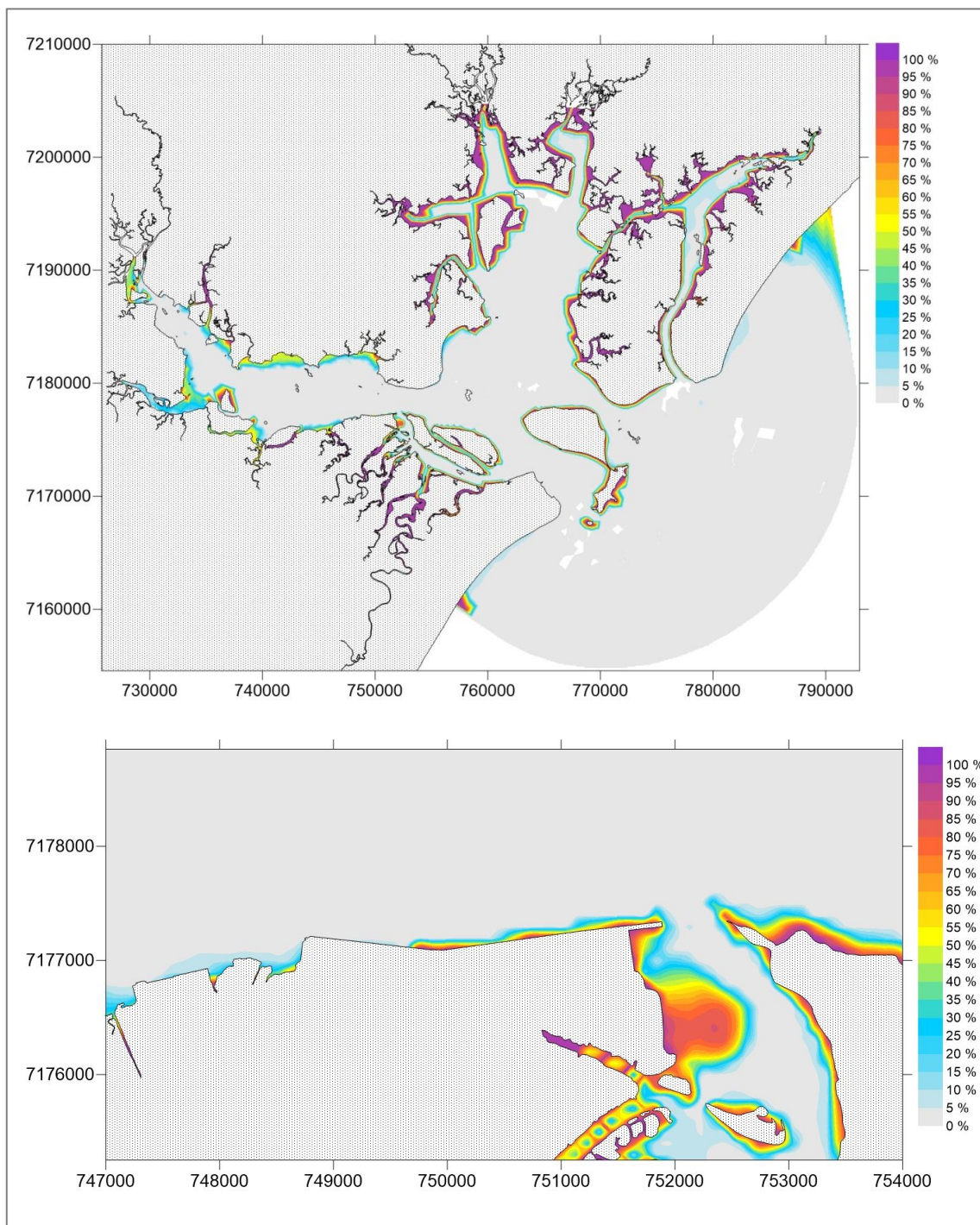




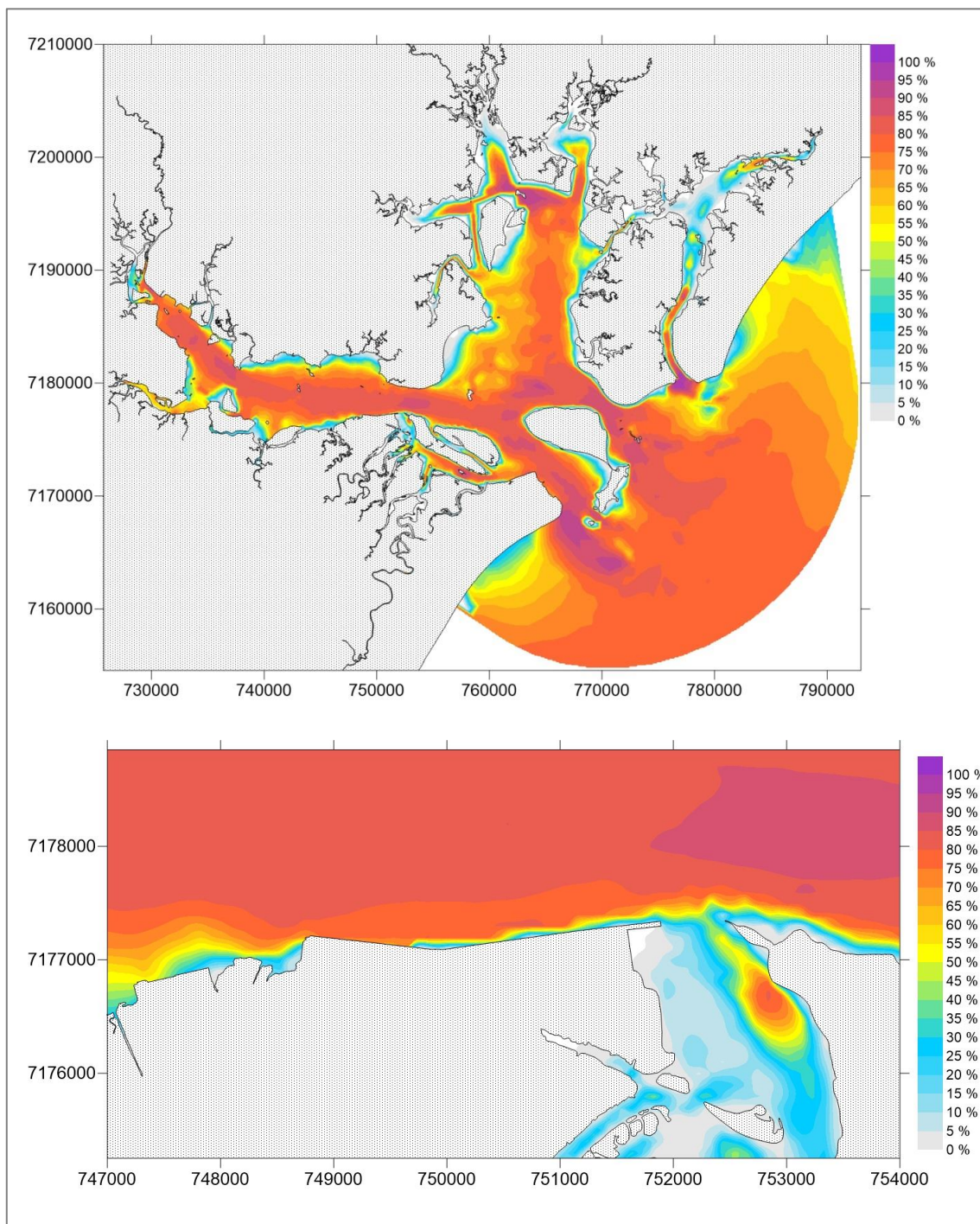
**Figura 44 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré enchente – quadratura – Cenário Diag – Verão.**

Para o cenário Diag – Verão, a Figura 45 apresenta as probabilidades de ocorrência de velocidades menores do que 0,01 m/s para toda a Baía e para a região de interesse desse estudo; de maneira semelhante, a Figura 46 apresenta as probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente maiores do que 0,1 m/s durante o ciclo de maré característico de verão. De maneira geral, observam-se altas probabilidades de ocorrência de baixas velocidades em algumas regiões das bordas da baía. Já velocidades maiores, ocorrem em regiões de maior profundidade – os resultados mostram que os canais formados pela Ilha do Mel (Canal da Galheta e Desembocadura Norte) e Canal do Superagui (direção Sul – Norte) tendem a guiar o campo de correntes na direção paralela aos contornos, intensificando seus valores; em parte do Canal da Galheta, a probabilidade de ocorrência de velocidades maiores do que 0,1 m/s é bastante alta, ultrapassando 90% do tempo. Na área de interesse, observa-se que as maiores velocidades ocorrem no canal em frente ao porto (regiões mais profundas). Já velocidades menores de 0,01 m/s, considerando a região de interesse, ocorrem na região do Canal da Cotinga e nas regiões menos profundas das margens.





**Figura 45 – Probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente menores do que 0,01 m/s para toda a área da baía de Paranaguá (acima) e para a região de interesse desse estudo (abaixo) – Cenário Diag – Verão.**



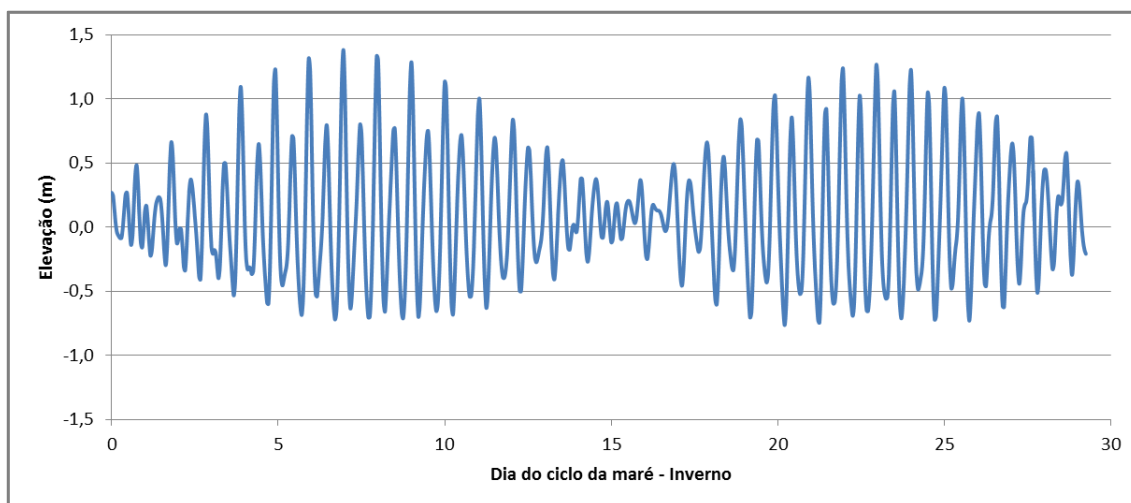
**Figura 46 – Probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente maiores do que 0,1 m/s para toda a área da baía de Paranaguá (acima) e para a região de interesse desse estudo (abaixo) – Cenário Diag – Verão.**

#### 1.4.2 Resultados de hidrodinâmica para o Cenário Diag – Inverno

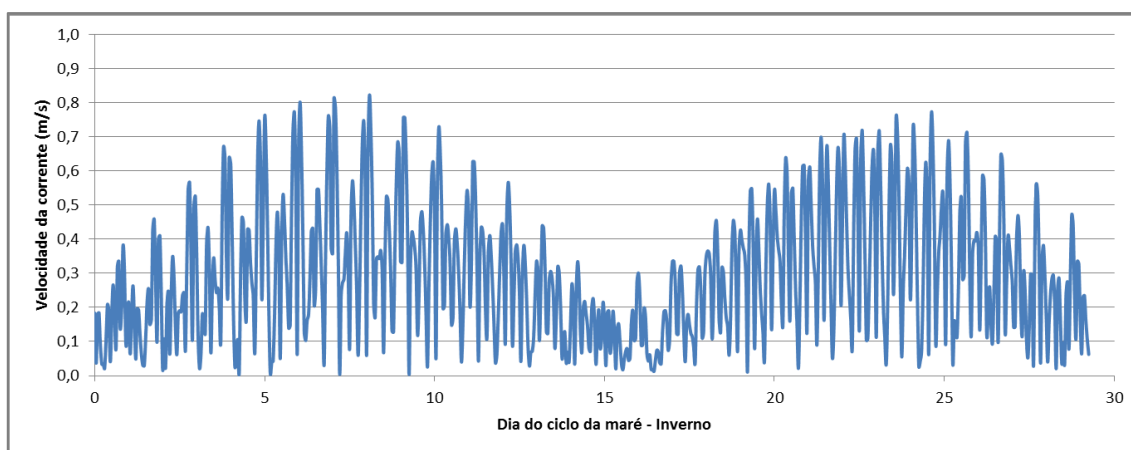
De maneira semelhante ao cenário Diag – Verão, para o cenário Diag – Inverno também são apresentados resultados temporais para elevação do nível da superfície livre (Figura 47), para as velocidades de corrente (Figura 48) e para a tensão no fundo (Figura 49). Para o ponto de



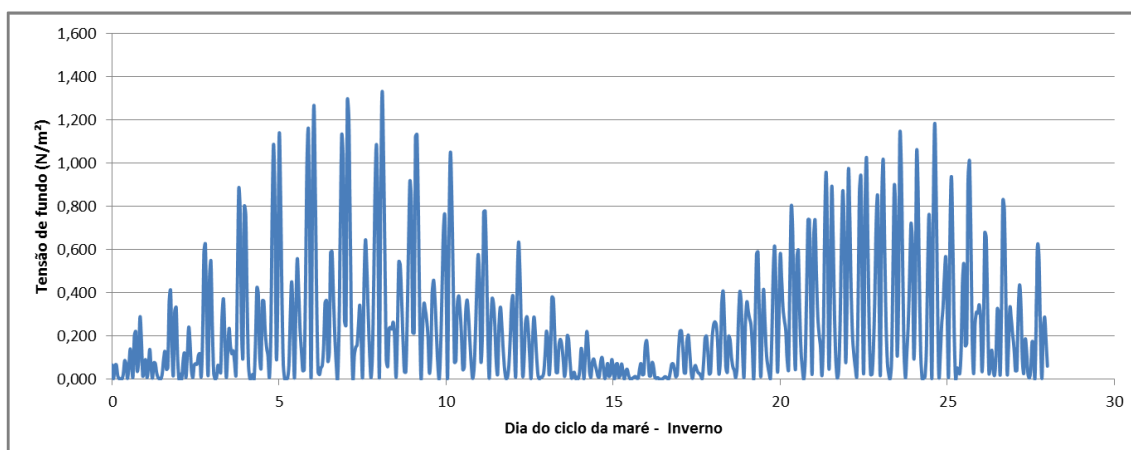
referência, os valores observados são semelhantes aos do cenário Diag – Verão, ou seja, a elevação varia entre -0,7 m e 1,4 m, enquanto as velocidades de corrente máximas são da ordem de 0,8 m/s e as tensões máximas no fundo são da ordem de 1,4 N/m<sup>2</sup>.





**Figura 47 – Série temporal de elevação – Cenário Diag – Inverno.**



**Figura 48 – Série temporal de velocidade de corrente – Cenário Diag – Inverno.**



 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	72

**Figura 49 – Série temporal de tensão no fundo – Cenário Diag – Inverno.**

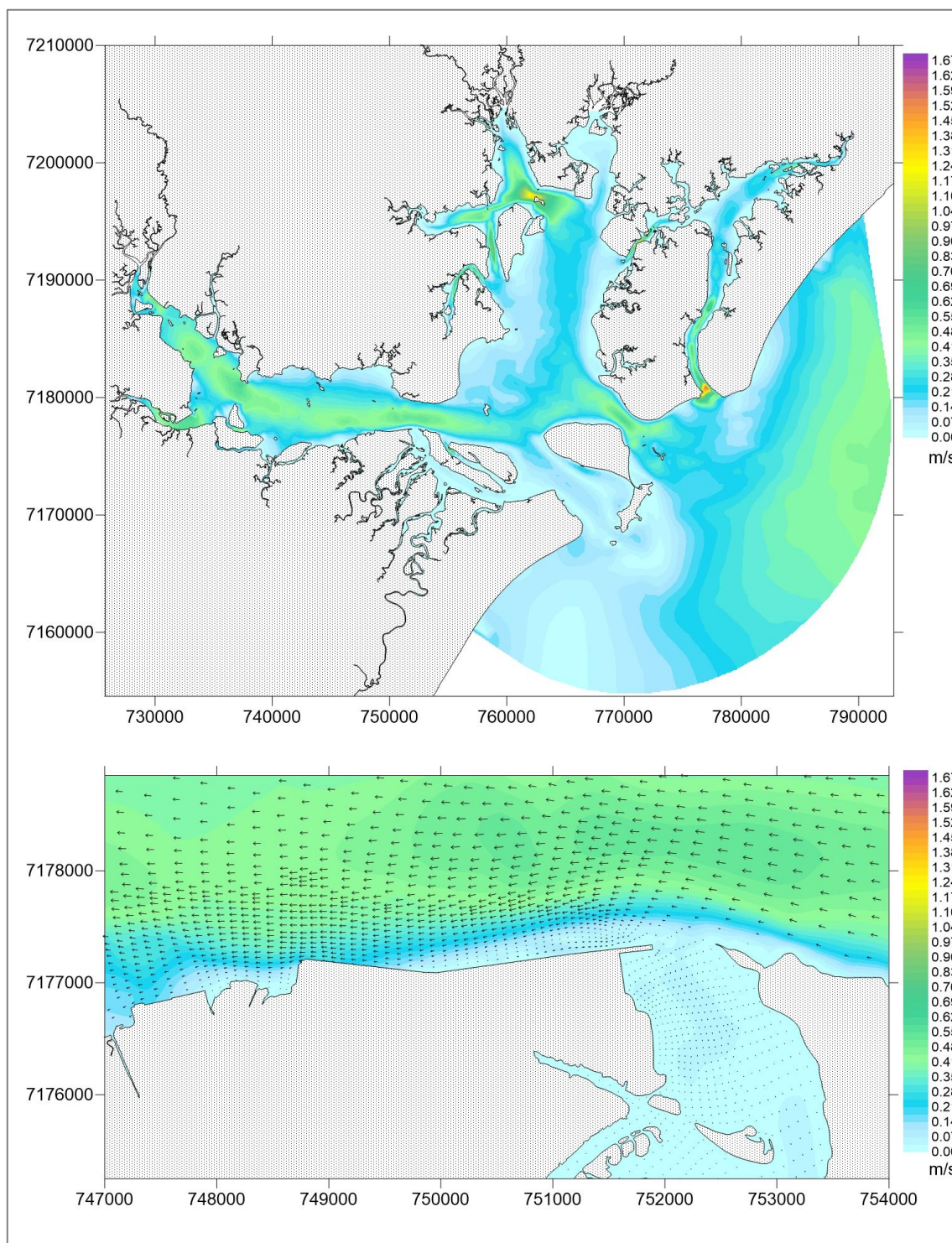
Na Tabela 8, com base nos resultados para o ponto de referência, são apresentados os períodos do ciclo de maré nos quais os resultados espaciais das velocidades de corrente são analisados – são apresentadas informações de elevação da superfície livre, módulo da velocidade de corrente e tensão no fundo.

**Tabela 8 – Elevação, módulo da velocidade de corrente e tensão no fundo no ponto de referência para os períodos selecionados para análise das distribuições espaciais – Cenário Diag – Inverno.**

Situação		Dia do ciclo de maré e hora	Elevação (m)	Velocidade de Corrente (m/s)	Tensão do Fundo (N/m <sup>2</sup> )
Sizígia	Meia-maré Enchente	Dia 23 - 10:00	0,0412	0,4437	0,3896
	Meia-maré Vazante	Dia 23 - 16:00	0,1735	0,7176	1,0159
	Preamar	Dia 23 - 13:00	1,2647	0,4600	0,4122
	Baixamar	Dia 23 - 21:00	-0,5472	0,0335	0,0022
Quadratura	Meia-maré Enchente	Dia 15 - 16:00	0,0224	0,1842	0,0672
	Meia-maré Vazante	Dia 15 - 20:00	-0,0043	0,1887	0,0705
	Preamar	Dia 15 - 17:00	0,1479	0,1899	0,0712
	Baixamar	Dia 15 - 15:00	-0,1001	0,0295	0,0017

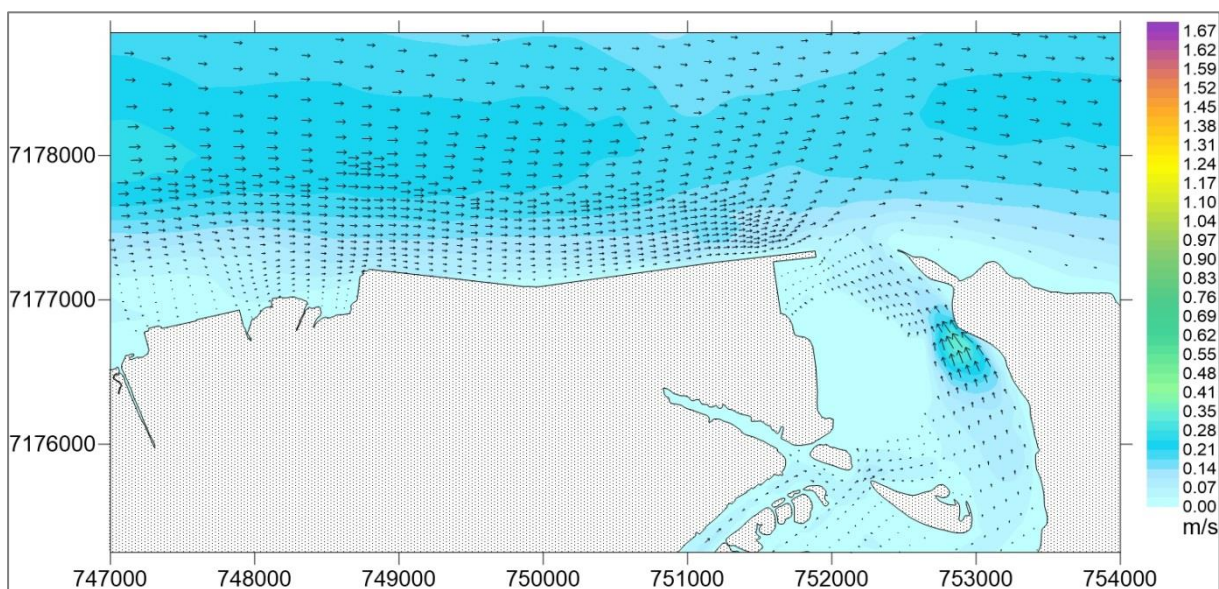
Para os períodos da tabela acima, as distribuições espaciais das velocidades de corrente são apresentadas da Figura 50 até a Figura 57. Os resultados espaciais são semelhantes aos do cenário Diag – Verão: em sizígia, para as situações de meia-maré vazante e preamar, as velocidades de corrente máximas são da ordem de 1,0 m/s. Para baixamar, estas não atingem 0,3 m/s enquanto que em meia-maré enchente as velocidades são da ordem de 0,9 m/s. Em quadratura, predominam velocidades da ordem de 0,3 m/s, sendo um pouco maiores em

meia-maré enchente. Considerando toda a baía, as maiores velocidades encontram-se na área da Desembocadura Sul, entre as Ilhas da Galheta e do Mel. Neste local a velocidade chega a 1,5 m/s.

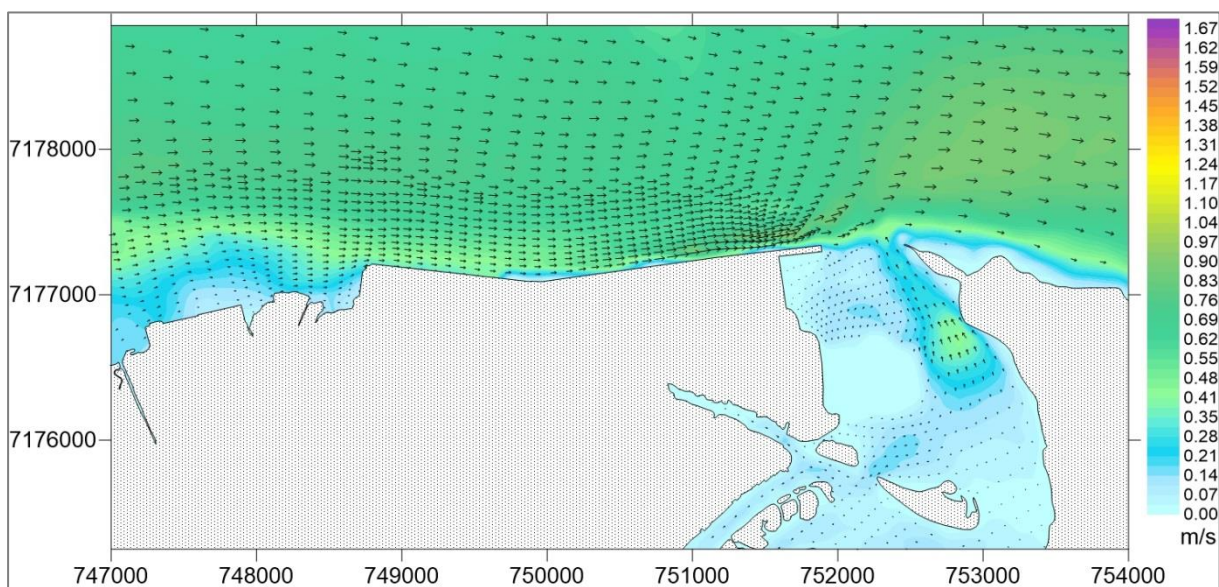


**Figura 50 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de preamar – sizígia – Cenário Diag – Inverno. Acima, resultados para toda a baía; abaixo, zoom na área de interesse.**

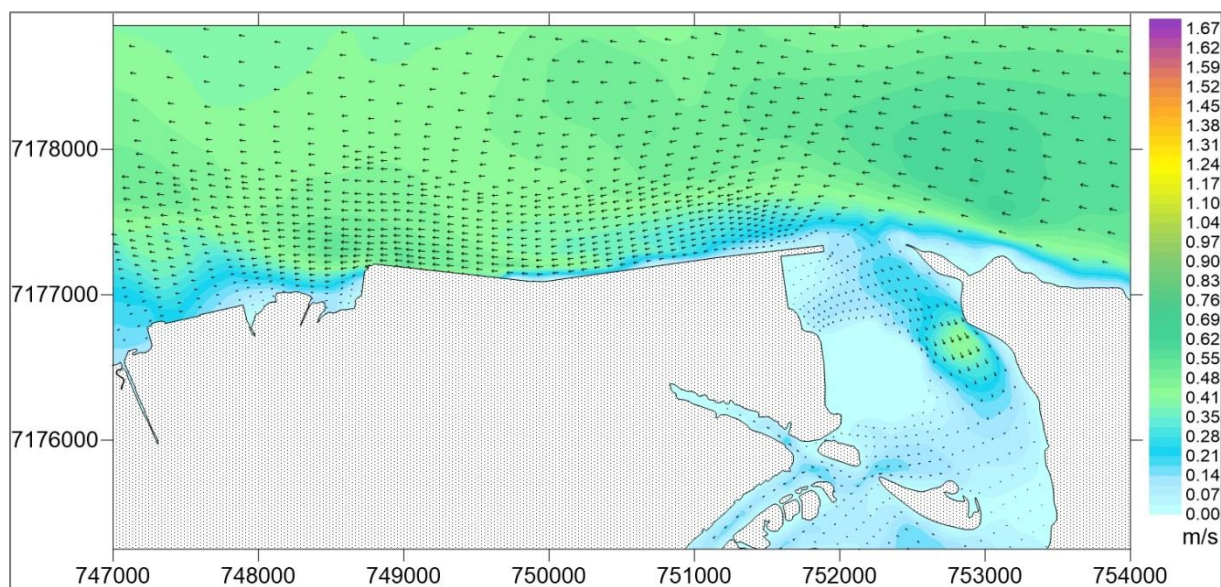




**Figura 51 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de baixamar – sizigia – Cenário Diag – Inverno.**

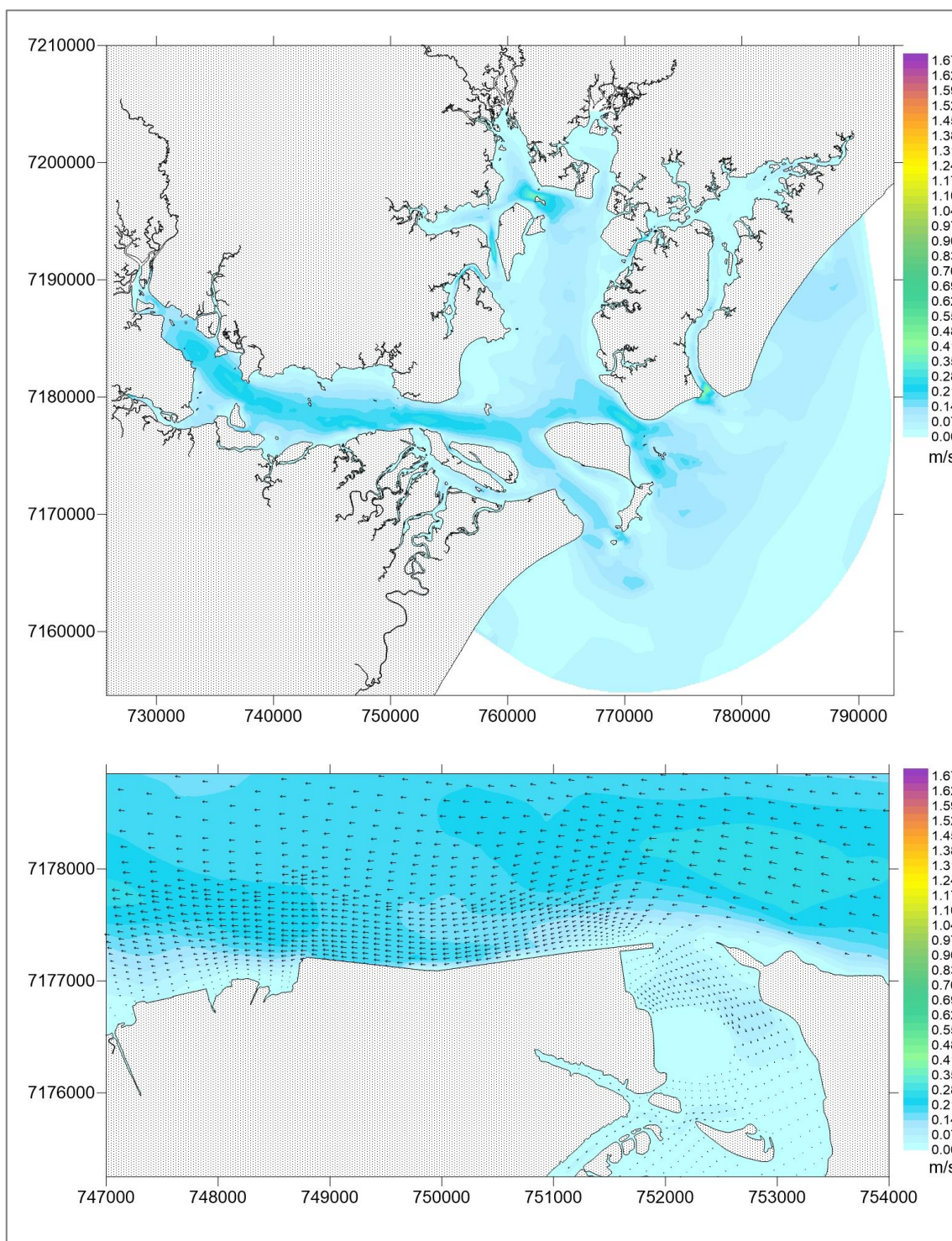


**Figura 52 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré vazante – sizigia – Cenário Diag – Inverno.**

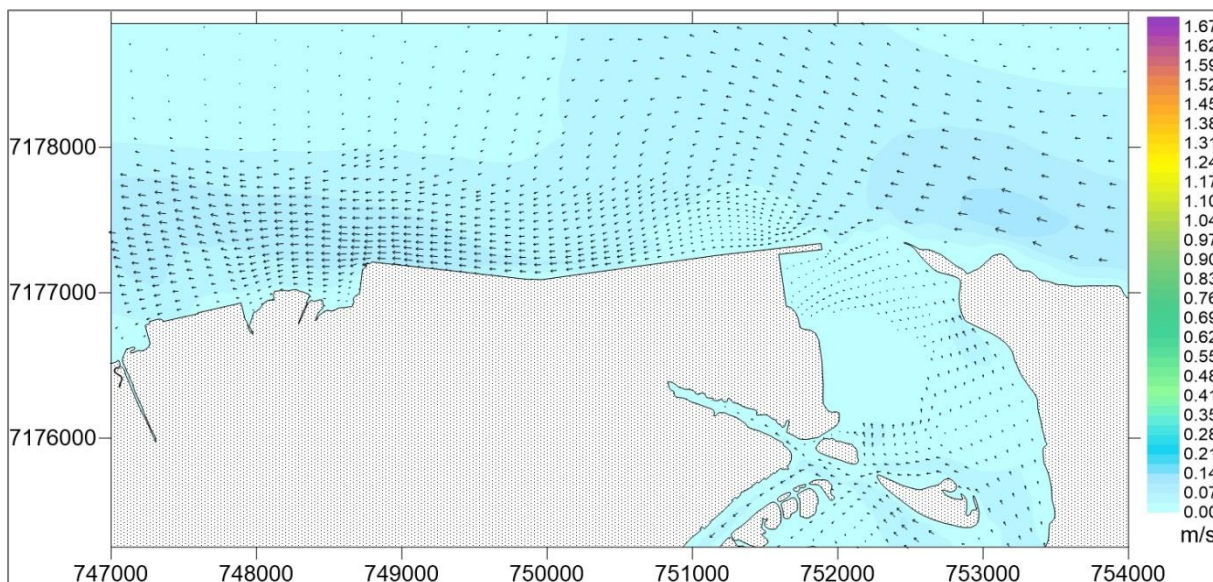


**Figura 53 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré enchente – sizígia – Cenário Diag – Inverno.**

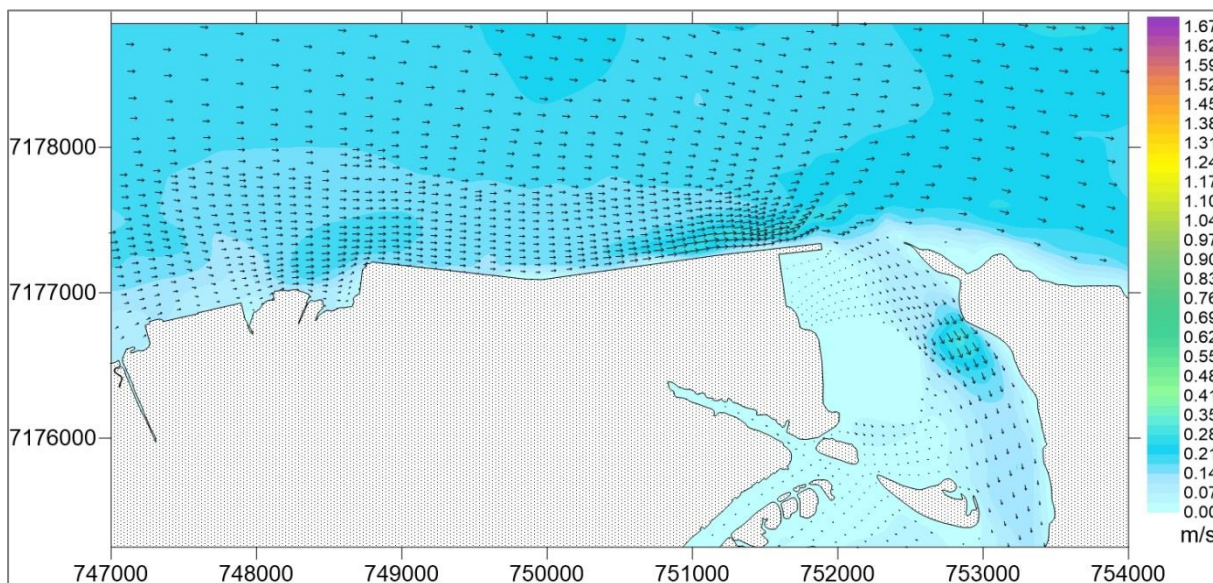




**Figura 54 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de preamar – quadratura – Cenário Diag – Inverno. Acima, resultados para toda a baía; abaixo, zoom na área de interesse.**

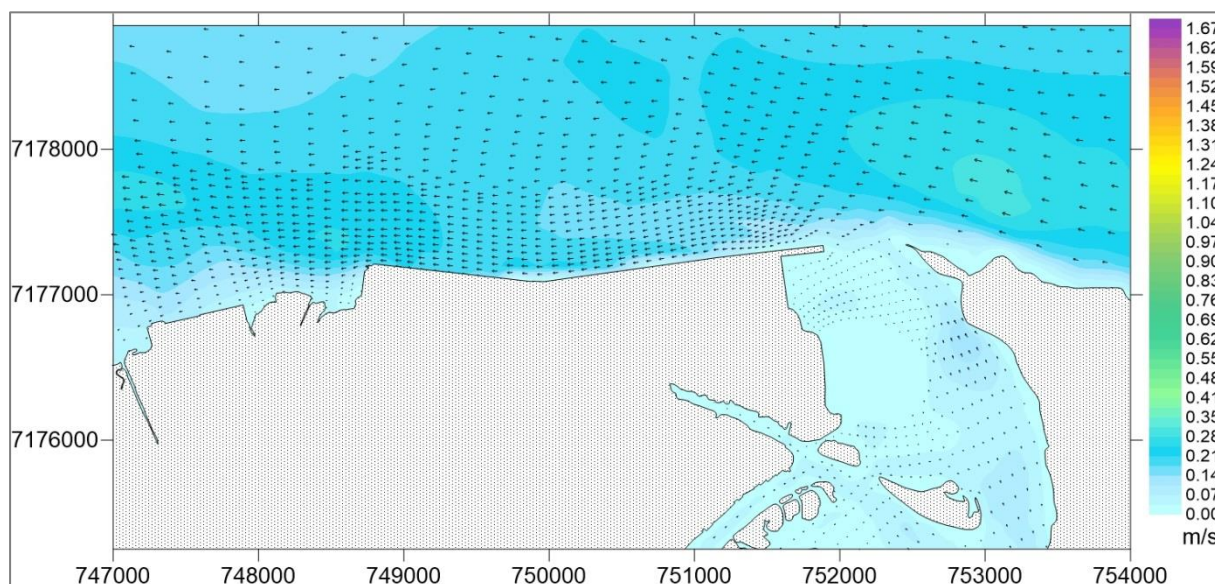


**Figura 55 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de baixamar – quadratura – Cenário Diag – Inverno.**



**Figura 56 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré vazante – quadratura – Cenário Diag – Inverno.**

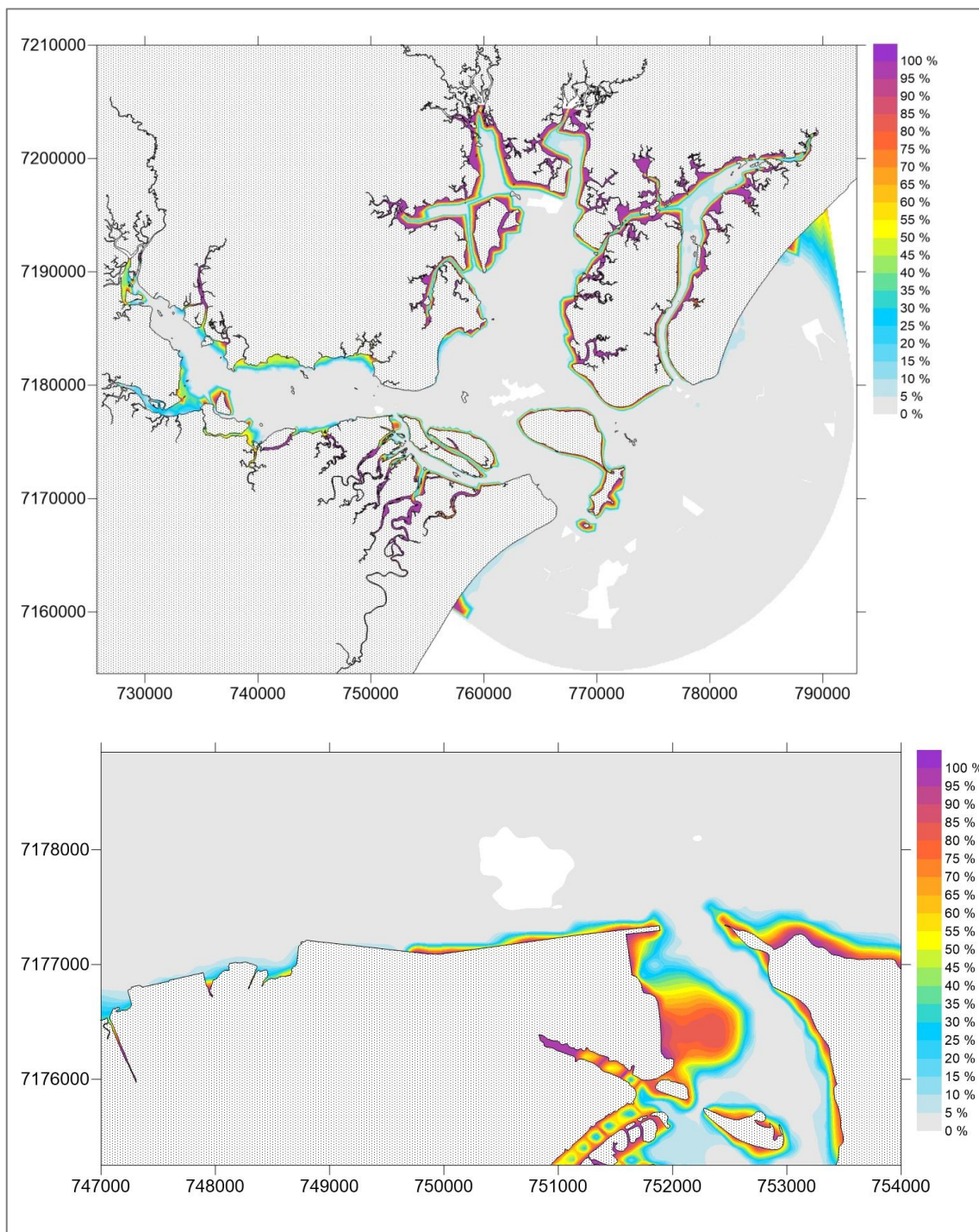




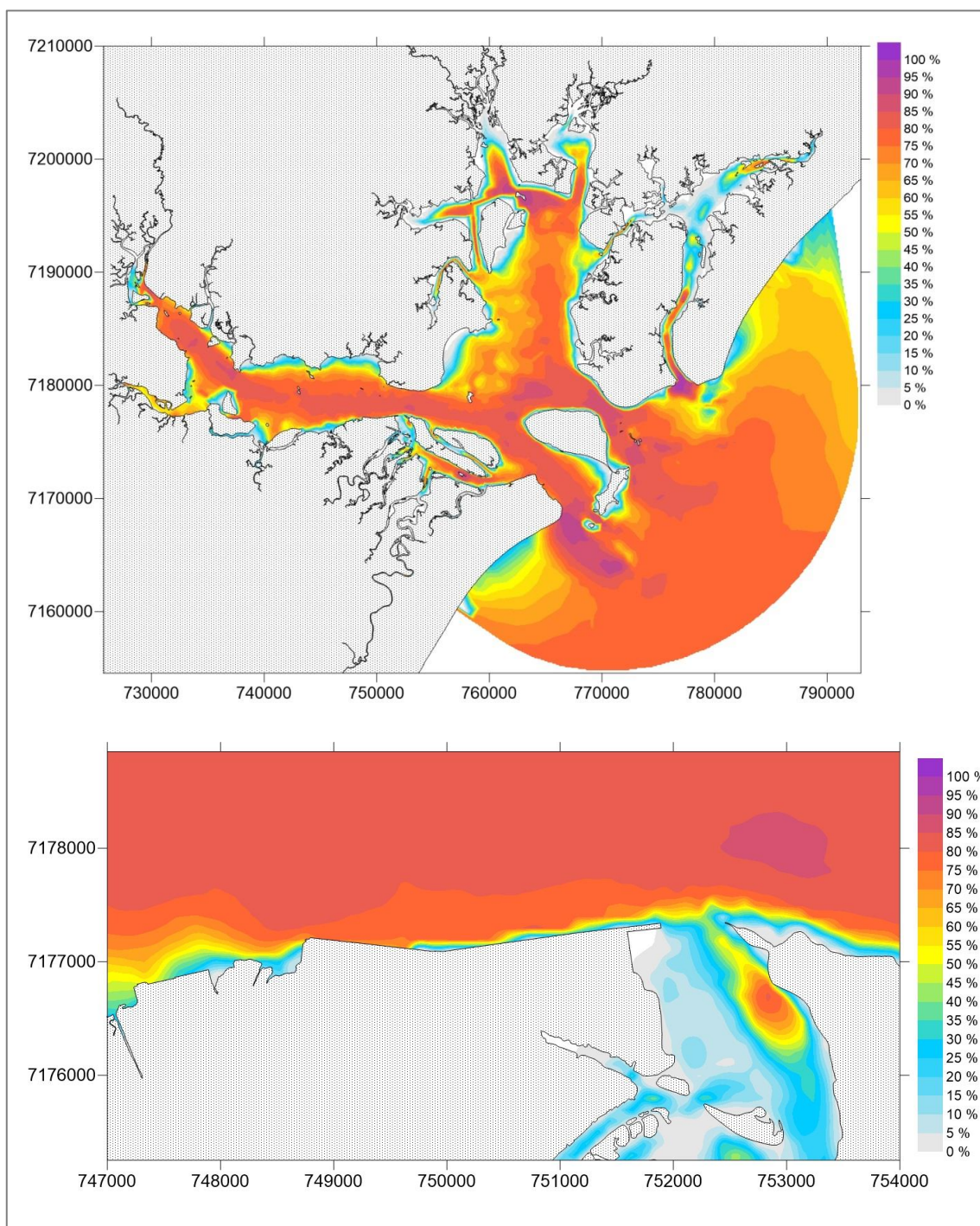
**Figura 57 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré enchente – quadratura – Cenário Diag – Inverno.**

A Figura 58 apresenta as probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente menores do que 0,01 m/s enquanto a Figura 59 apresenta as probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente maiores do que 0,1 m/s durante o ciclo típico de maré de inverno. Novamente se observam maiores velocidades em regiões mais profundas e maiores probabilidades de velocidades menores nas bordas da baía. O mesmo ocorre na área de maior interesse desse estudo.





**Figura 58 – Probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente menores do que 0,01 m/s para toda a área da baía de Paranaguá (acima) e para a região de interesse desse estudo (abaixo) – Cenário Diag – Inverno.**



**Figura 59 – Probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente maiores do que 0,1 m/s para toda a área da baía de Paranaguá (acima) e para a região de interesse desse estudo (abaixo) – Cenário Diag – Inverno.**

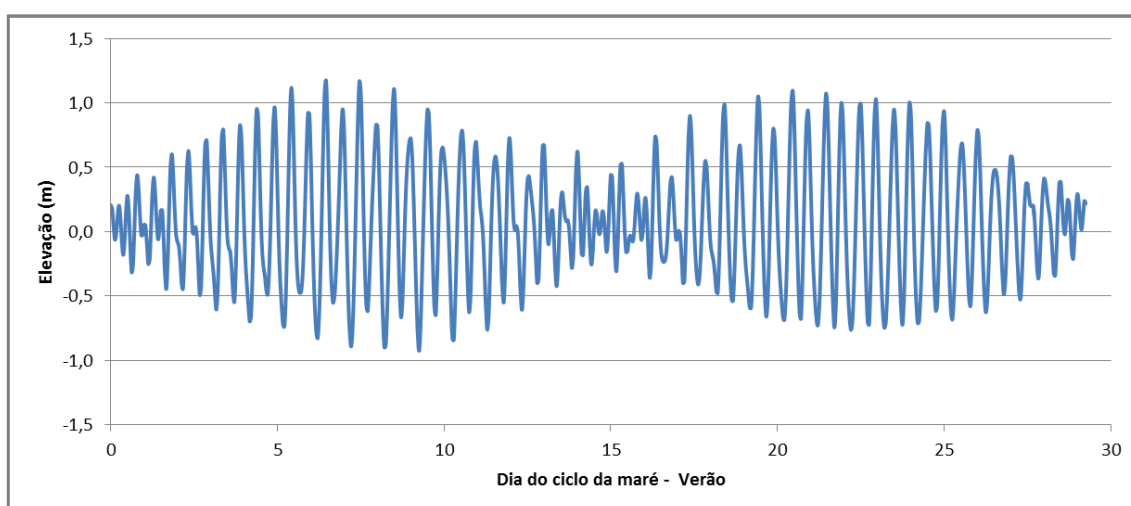
### 1.4.3 Resultados de hidrodinâmica para o Cenário Prog-T – Verão

O cenário Prog-T considera a primeira alteração de batimetria resultante da dragagem para a construção do Píer T. Para a situação de Verão (cenário de Prog-T – Verão), a Figura 60 apresenta a evolução temporal de elevação do nível da superfície livre no ponto da Figura 32

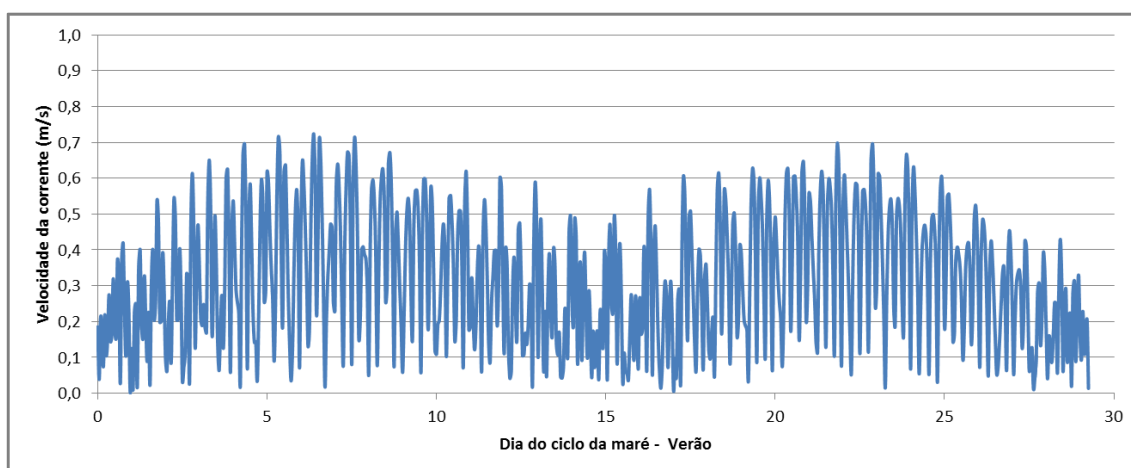


– se observa que as elevações ficam entre cerca de -0,9 m e 1,2 m, as quais diferem um pouco daquelas observadas no cenário Diag – Verão. Para o mesmo ponto, a Figura 61 mostra a evolução temporal das velocidades de corrente, cujas máximas são da ordem de 0,7 m/s. A Figura 62 apresenta a série temporal do módulo de tensão do fundo, o qual chega a cerca de 1,0 N/m<sup>2</sup>, sendo este menor do que o observado no cenário Diag – Verão.

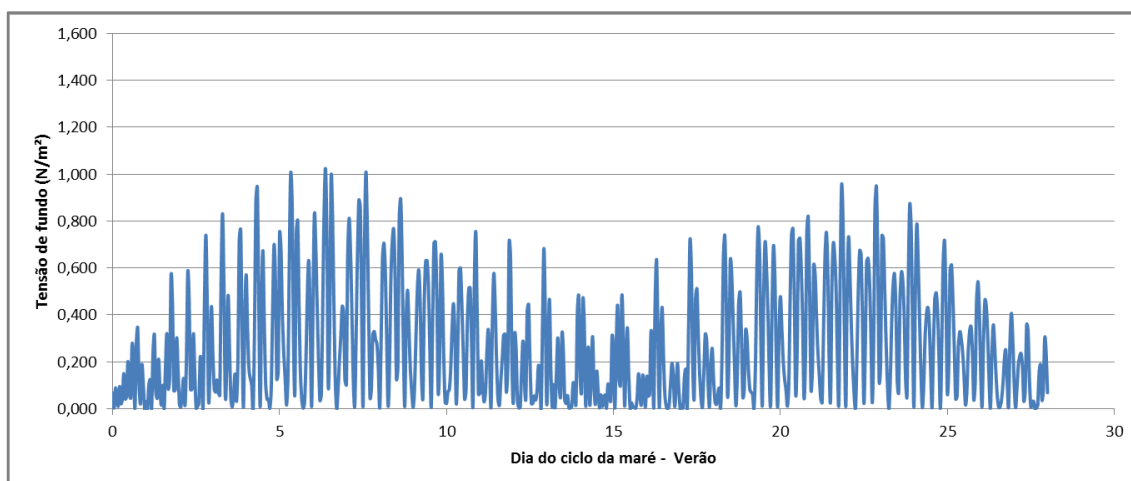
Em comparação com o Cenário Diag – Verão, são observadas diferenças entre as amplitudes e as elevações da superfície livre. Essas diferenças podem ser atribuídas às alterações de batimetria na região próxima ao ponto de referência.



**Figura 60 – Série temporal de elevação – Cenário Prog-T – Verão.**



**Figura 61 – Série temporal de velocidade de corrente – Cenário Prog-T – Verão.**



**Figura 62 – Série temporal de tensão no fundo – Cenário Prog-T – Verão.**

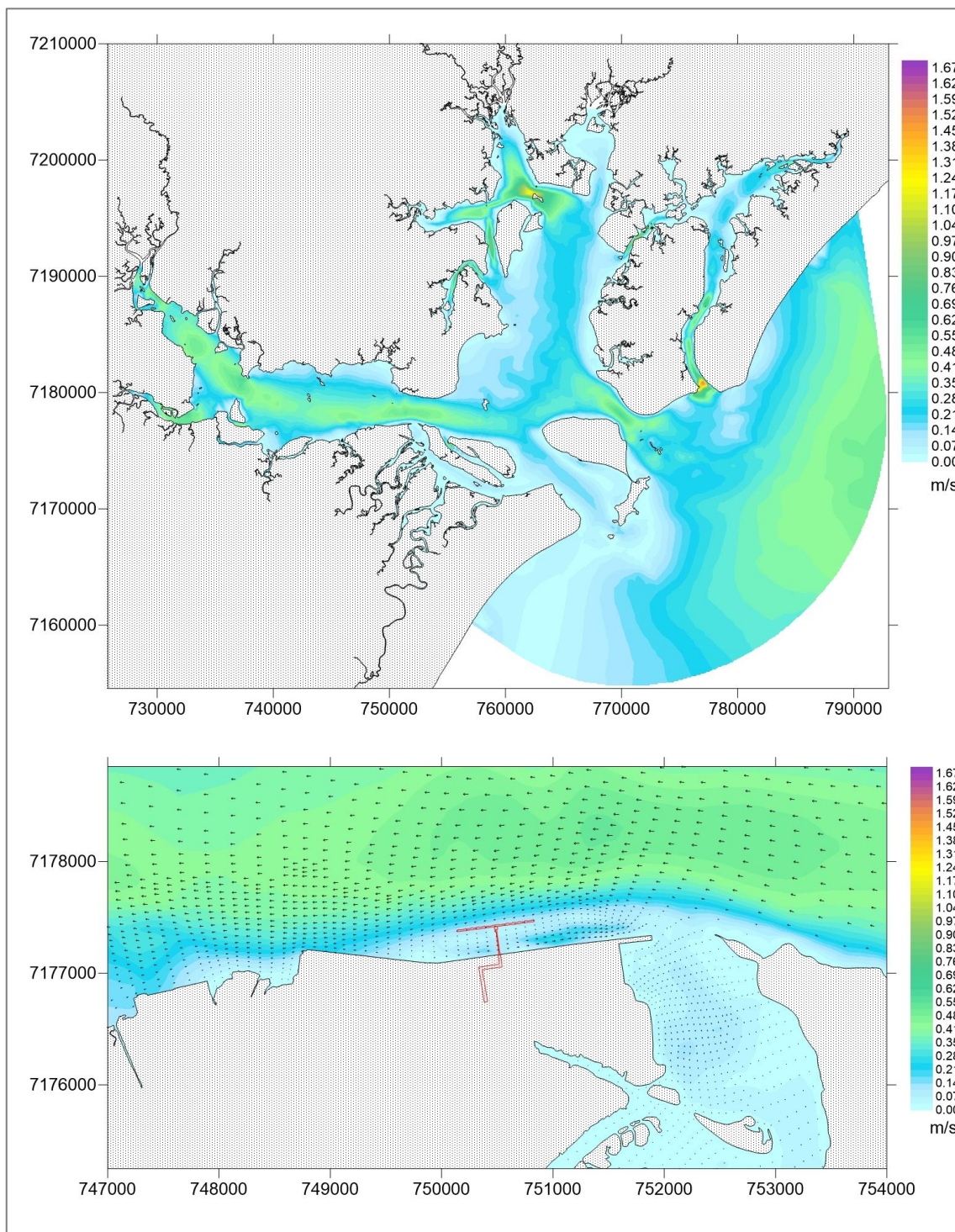
Com base na série temporal de elevação apresentada na Figura 60 foram definidos os tempos para análise dos resultados espaciais – esses tempos e respectivas elevações, velocidades de corrente e valores de tensão no fundo são apresentados na Tabela 9. As distribuições espaciais das velocidades de corrente são apresentadas da Figura 63 até a Figura 70. De maneira geral, em sizígia, para as situações de meia-maré enchente e meia-maré vazante, as velocidades de corrente ficam próximas 1,0 m/s na área de interesse desse estudo; na mesma região, em preamar as velocidades ficam em torno de 0,7 m/s e em baixamar estas não ultrapassam 0,3 m/s. Em quadratura, predominam velocidades menores que de 0,3 m/s tanto para preamar quanto para baixamar, e para meia-maré enchente e vazante são da ordem de 0,7 m/s. Na área do píer, as maiores velocidades são da ordem de 0,4 m/s em sizígia (meia-maré vazante); as menores velocidades, dentre os momentos observados ocorrem na situação de baixamar de sizígia e são da ordem de 0,07 m/s.

**Tabela 9 – Elevação, módulo da velocidade de corrente e tensão no fundo no ponto de referência para os períodos selecionados para análise das distribuições espaciais – Cenário Prog-T – Verão**

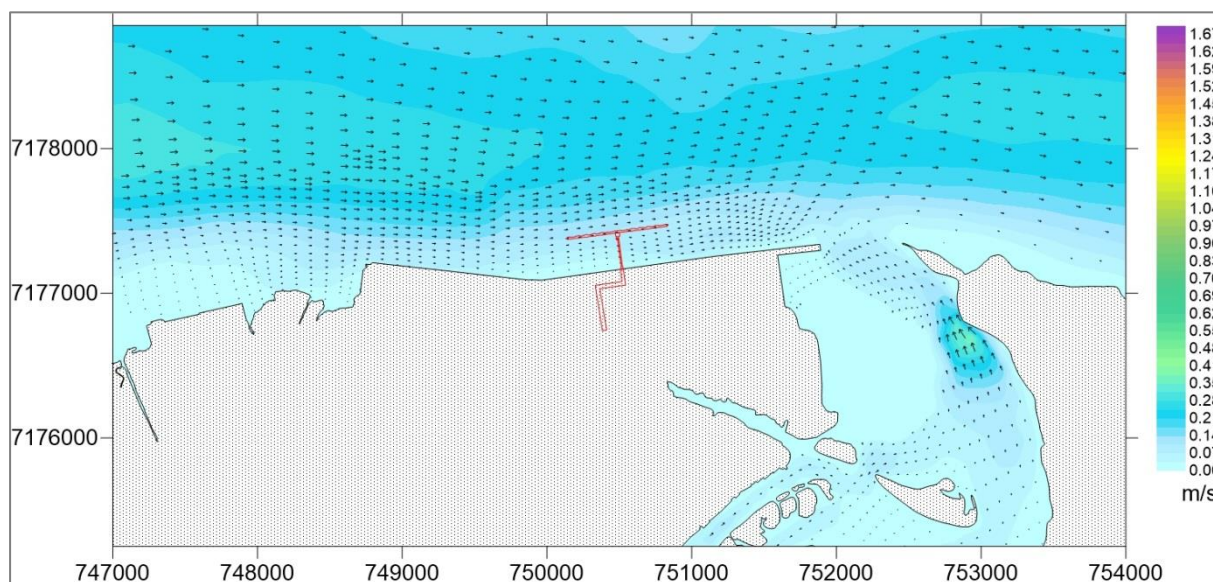
Situação		Dia do ciclo de maré e hora	Elevação (m)	Velocidade de corrente (m/s)	Tensão no fundo (N/m <sup>2</sup> )
Sizígia	Meia-maré Enchente	Dia 8 - 2:00	0,4407	0,6733	0,8896
	Meia-maré Vazante	Dia 8 - 7:00	0,1523	0,7140	1,0064
	Preamar	Dia 8 - 4:00	1,1665	0,4630	0,4148

Situação		Dia do ciclo de maré e hora	Elevação (m)	Velocidade de corrente (m/s)	Tensão no fundo (N/m <sup>2</sup> )
	Baixamar	Dia 7 - 22:00	-0,8919	0,2468	0,1230
Quadratura	Meia-maré Enchente	Dia 15 - 16:00	0,2083	0,3957	0,3087
	Meia-maré Vazante	Dia 15 - 20:00	-0,1656	0,4699	0,4388
	Preamar	Dia 15 - 18:00	0,4236	0,0369	0,0027
	Baixamar	Dia 15 - 21:00	-0,3080	0,2502	0,1248

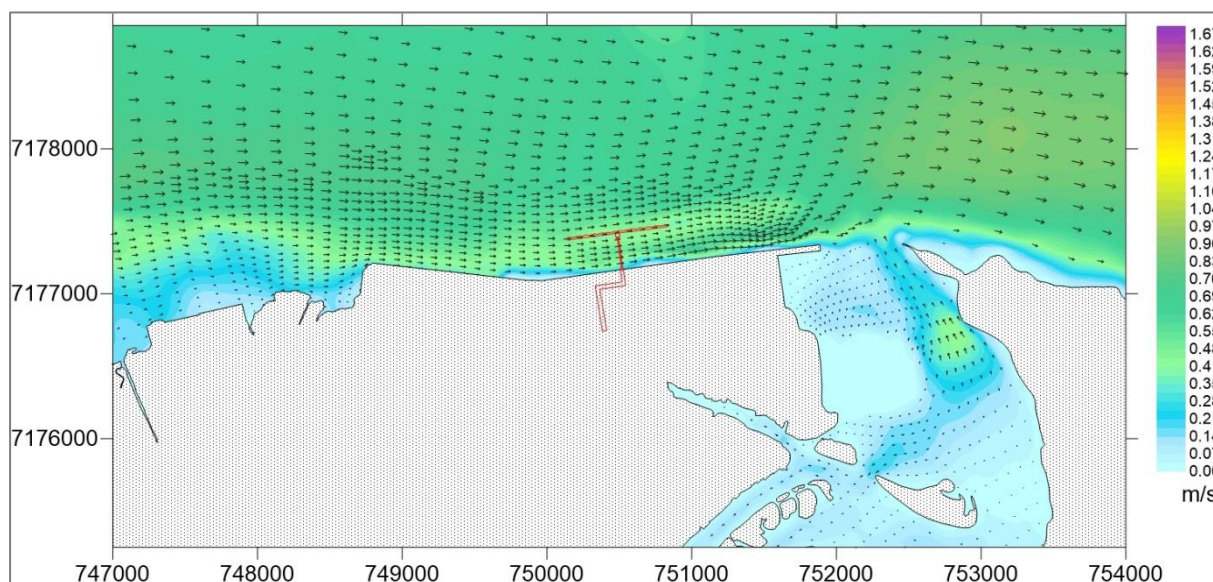




**Figura 63 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de preamar – sizígia – Cenário Prog-T – Verão. Acima, resultados para toda a baía; abaixo, zoom na área de interesse.**

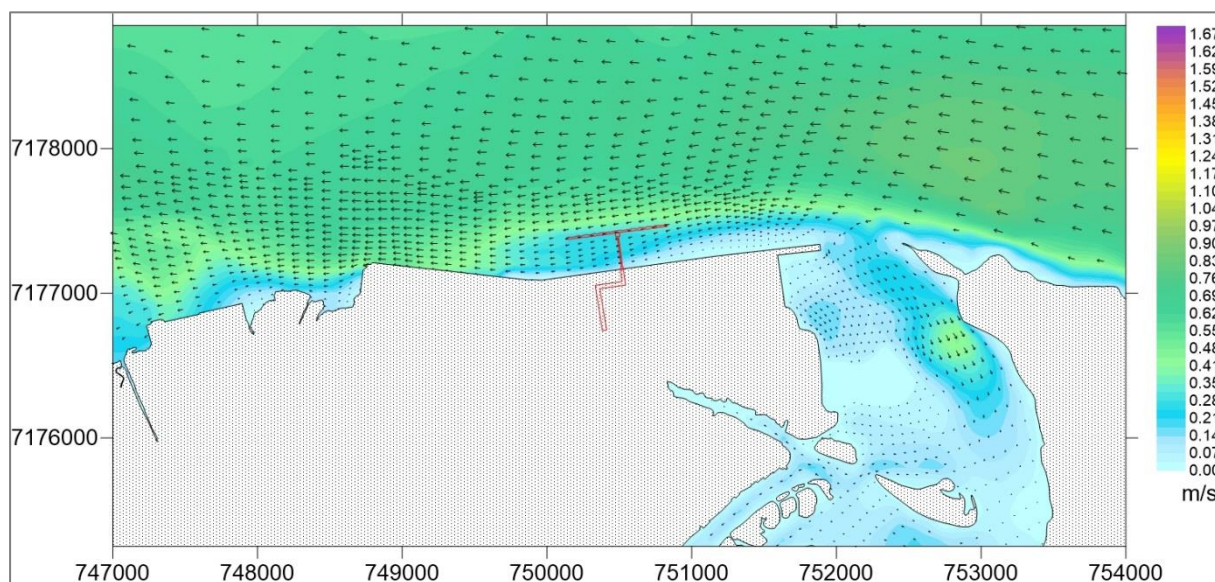


**Figura 64 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de baixamar – sizígia – Cenário Prog-T – Verão.**

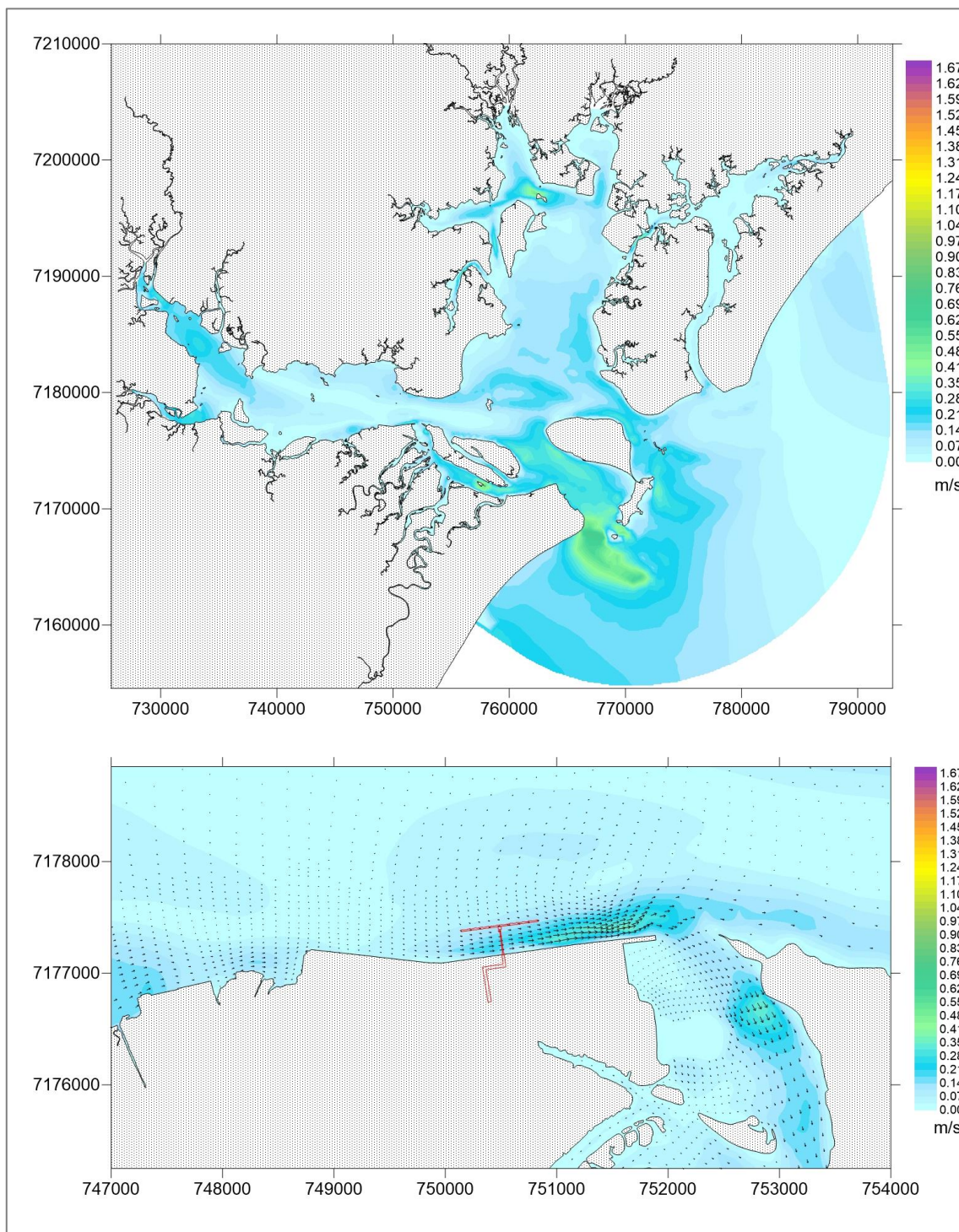


**Figura 65 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré vazante – sizígia – Cenário Prog-T – Verão.**



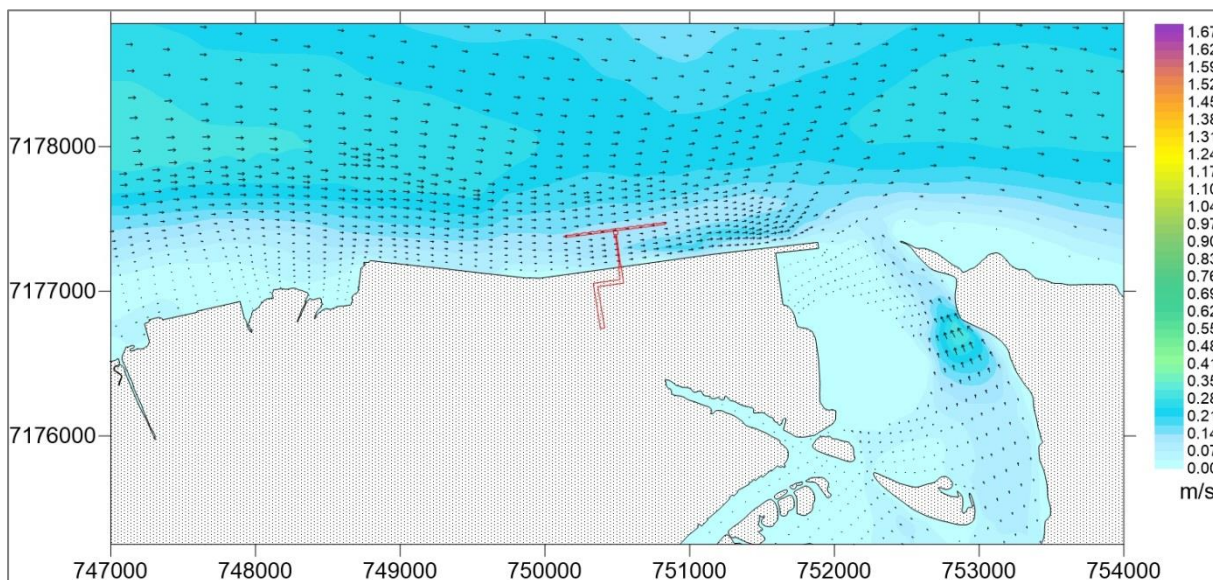


**Figura 66 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré enchente – sizígia – Cenário Prog-T – Verão.**

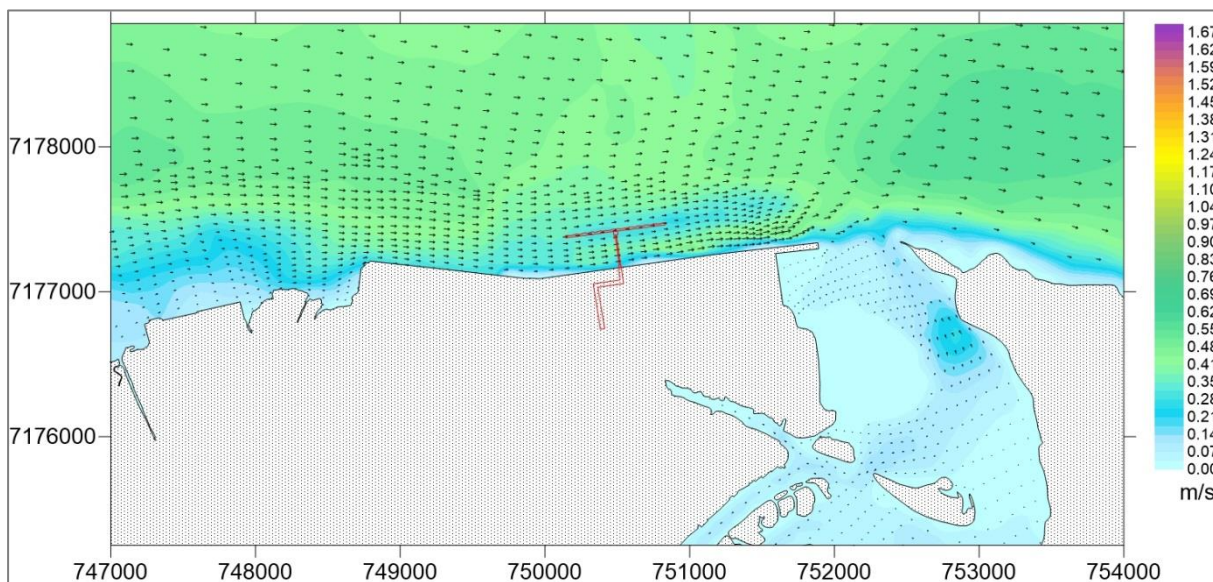


**Figura 67 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de preamar – quadratura – Cenário Prog-T – Verão. Acima, resultados para toda a baía; abaixo, zoom na área de interesse.**

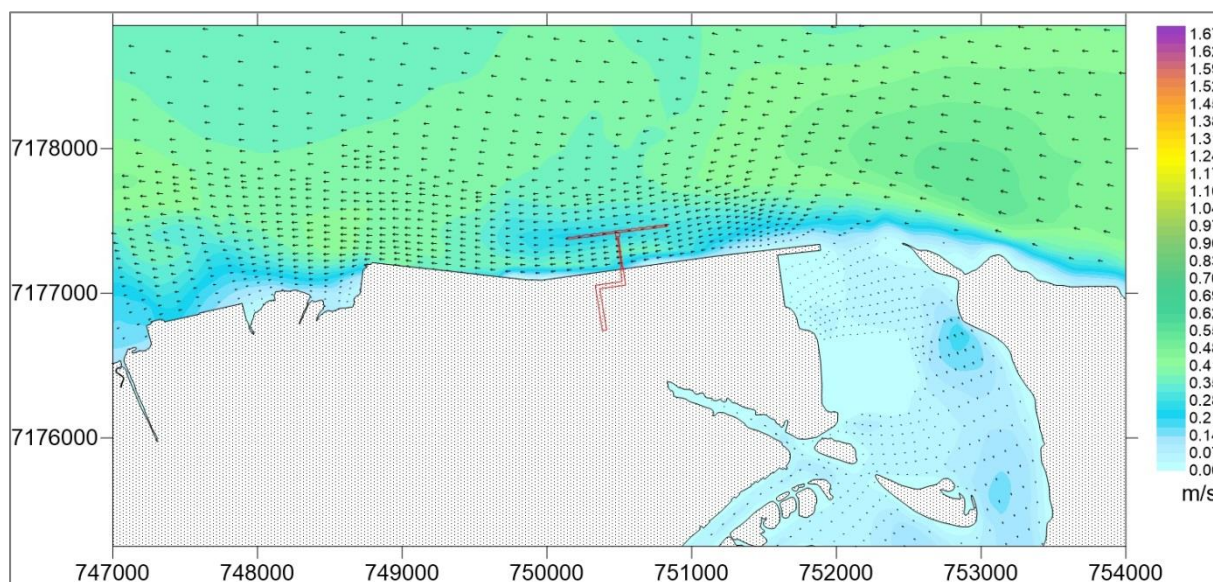




**Figura 68 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de baixamar – quadratura – Cenário Prog-T – Verão.**

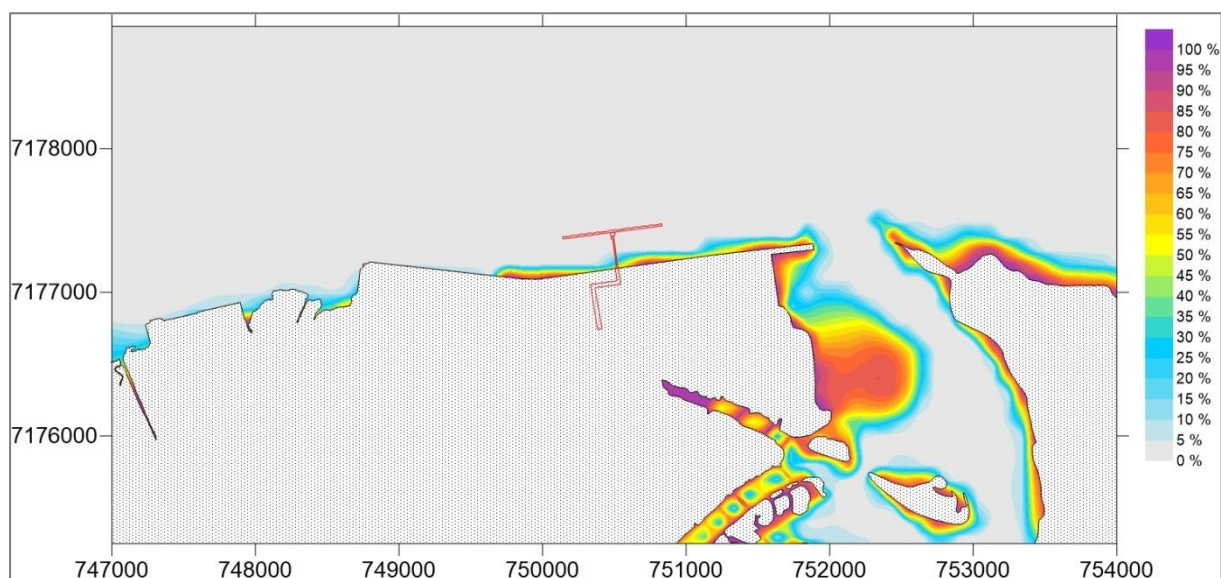


**Figura 69 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré vazante – quadratura – Cenário Prog-T – Verão.**



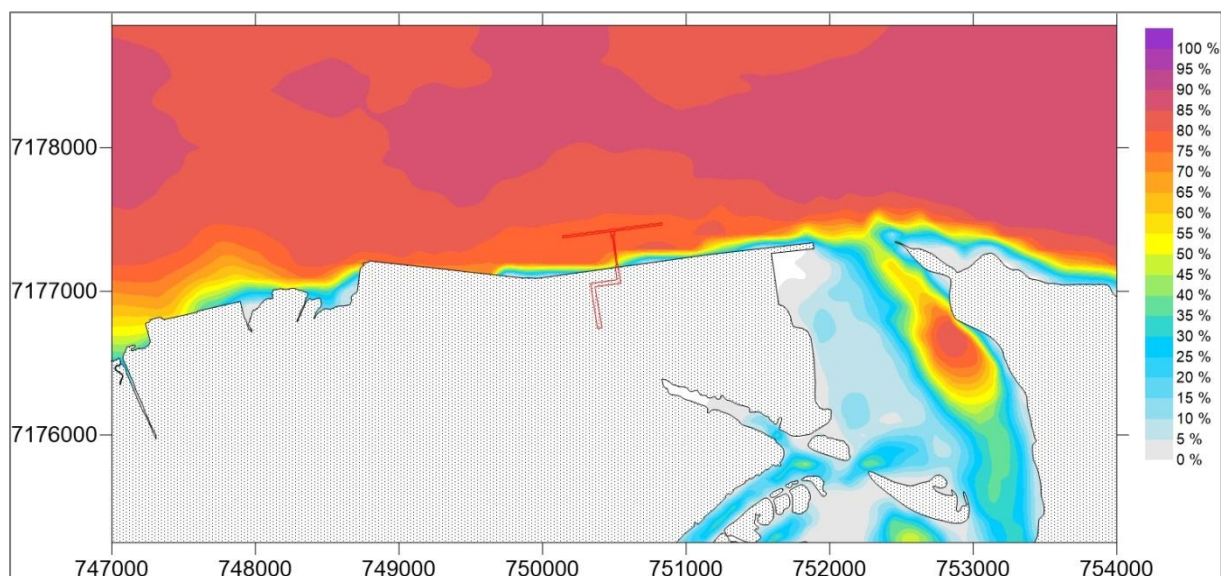
**Figura 70 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré enchente – quadratura – Cenário Prog-T – Verão.**

Para este cenário, as probabilidades de ocorrência de velocidades menores do que 0,01 m/s são apresentadas na Figura 71 enquanto na Figura 72 são apresentadas as probabilidades de ocorrência de velocidades maiores do que 0,1 m/s – ambas consideram o período de um ciclo de maré característico de verão. A comparação com o cenário Diag mostra que há uma redução de cerca de 10 a 15% na probabilidade de ocorrência de velocidades acima de 0,1 m/s na área correspondente à construção do píer T. Já para velocidades menores de 0,01 m/s não houve diferenças significativas entre os dois cenários.



**Figura 71 – Probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente menores do que 0,01 m/s no Complexo Estuarino Paranaguá – Cenário Prog-T – Verão.**

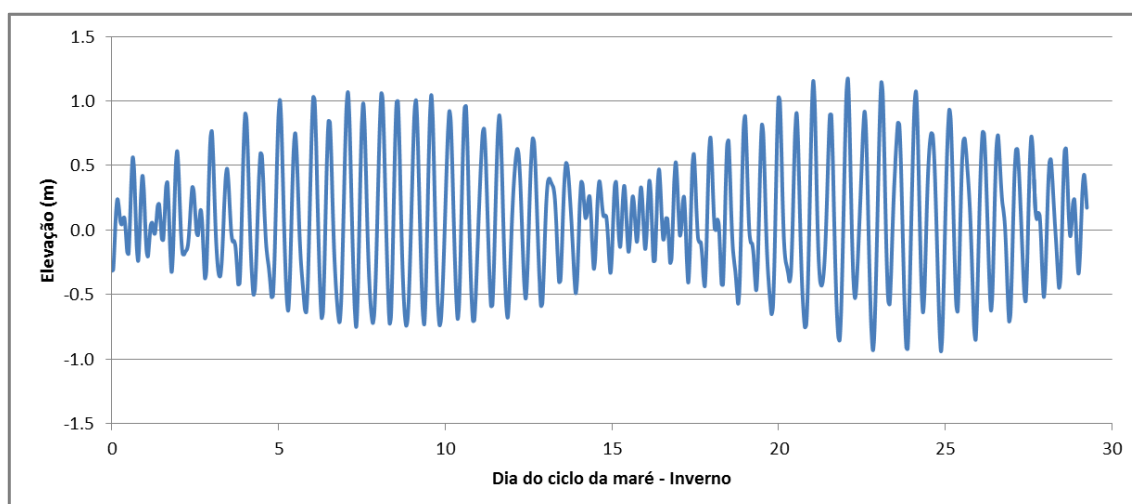




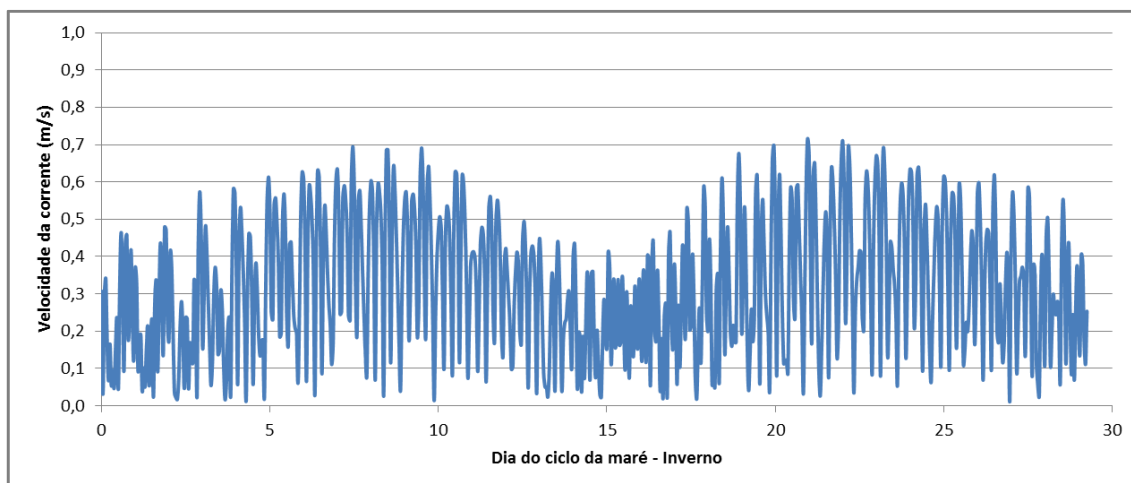
**Figura 72 – Probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente maiores do que 0,1 m/s no Complexo Estuarino Paranaguá – Cenário Prog-T – Verão.**

#### 1.4.4 Resultados de hidrodinâmica para o Cenário Prog-T-Inverno

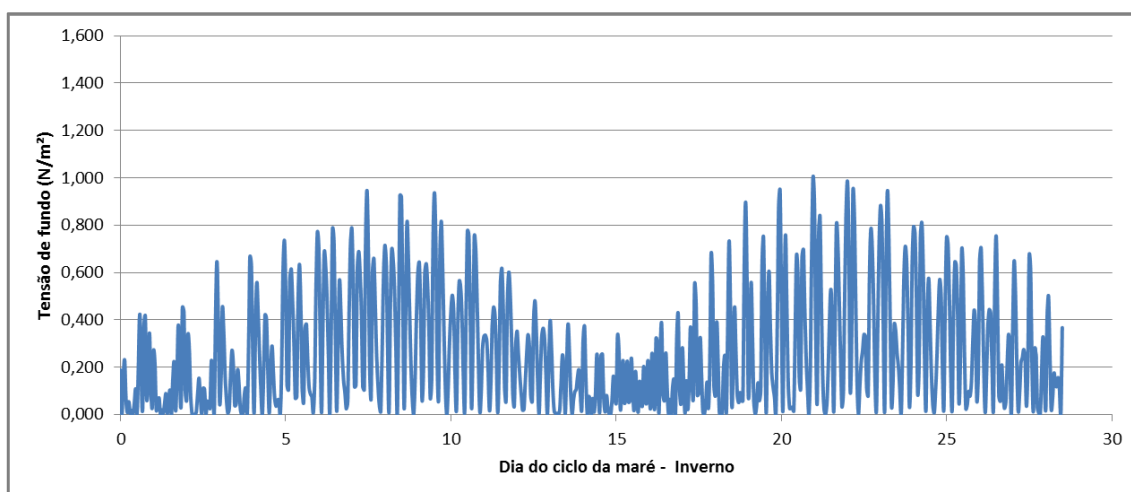
De mesma forma que para o cenário de Verão, para o cenário Prog-T – Inverno também são apresentados resultados temporais para elevação do nível da superfície livre (Figura 73), para as velocidades de corrente (Figura 74) e para a tensão no fundo (Figura 75). Para o ponto de referência, os valores de elevação são menores daqueles do Cenário Prog-T – Verão e do Cenário Diag – Inverno (diagnóstico); aqui a elevação varia entre -0,7 m e 1,1 m. As velocidades de corrente máximas (que em geral ocorrem em conjunto com as maiores elevações), são da ordem de 0,7 m/s enquanto o módulo de tensão máximo é da ordem de 1,0 N/m<sup>2</sup>.



**Figura 73 – Série temporal de elevação – Cenário Prog-T – Inverno.**





**Figura 74 – Série temporal de velocidade de corrente – Cenário Prog-T – Inverno.**



**Figura 75 – Série temporal de tensão no fundo – Cenário Prog-T – Inverno.**

Os tempos definidos para observação dos resultados espaciais para este cenário são apresentados na Tabela 10 em conjunto com a magnitude da elevação da superfície livre, módulo da velocidade de corrente e da tensão no fundo. As respectivas distribuições espaciais das velocidades de corrente são apresentadas da Figura 76 até a Figura 83. Na área de interesse, os resultados espaciais são semelhantes aos dos cenários de Verão: em sizígia, para as situações de meia-maré vazante e meia-maré enchente, as velocidades de corrente máximas são da ordem de 1,0 m/s, predominando valores da ordem de 0,7 m/s. Já em baixamar as velocidades não atingem 0,3 m/s e em preamar há uma região próxima ao píer T aonde as velocidades chegam a 0,7 m/s; no restante da região estas não passam de 0,25 m/s. Em quadratura, predominam velocidades da ordem de 0,3 m/s, sendo registrado em meia-maré vazante velocidades de cerca de 0,7 m/s. Considerando toda a baía, as maiores

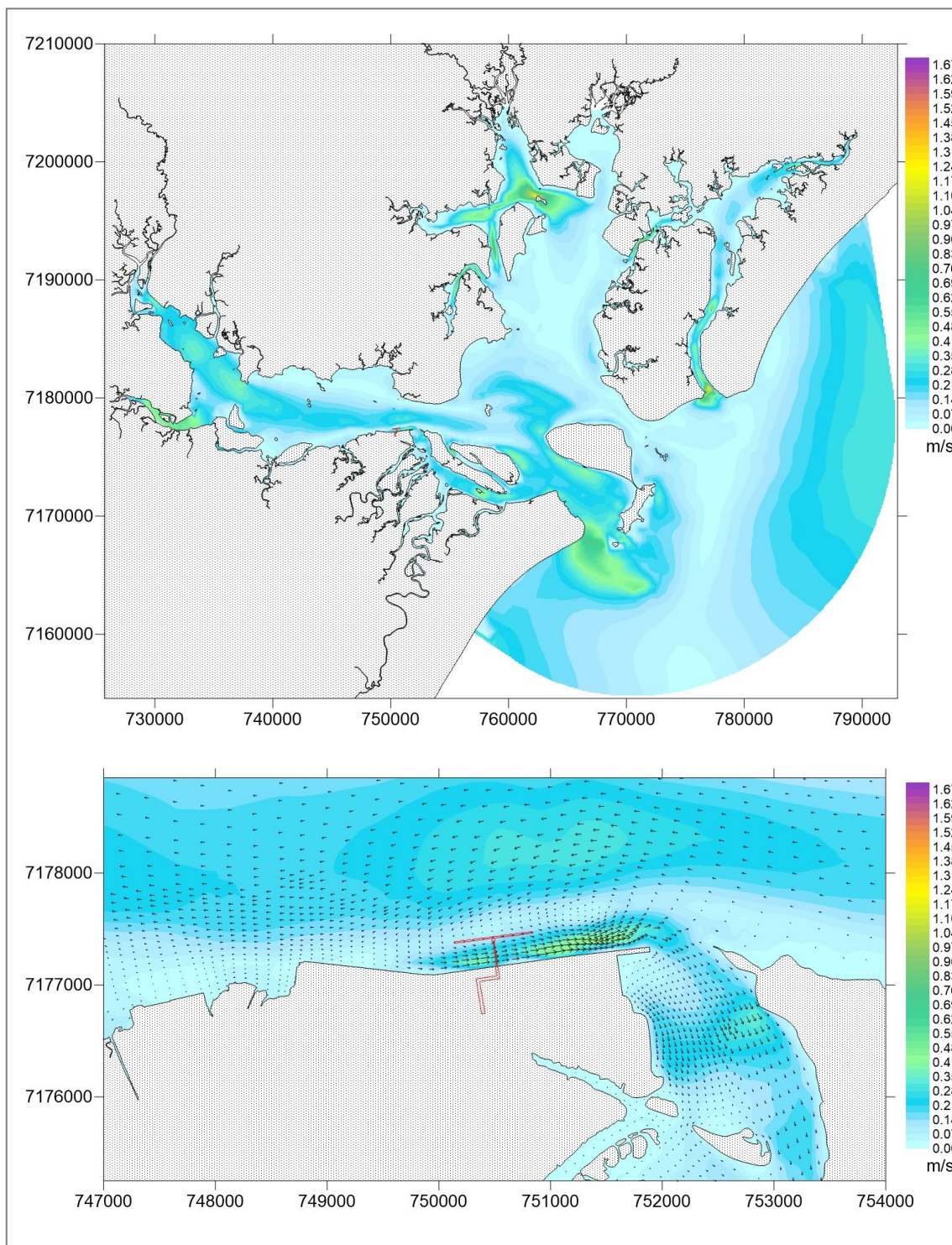


		Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:  92
		Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	

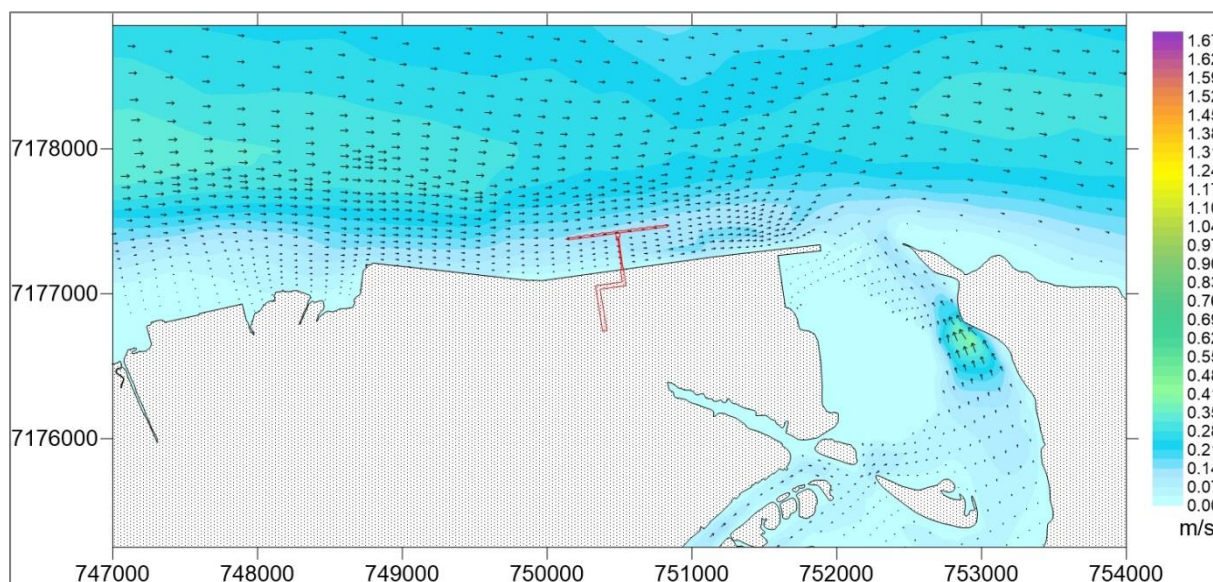
velocidades encontram-se na área entre Pontal do Paraná e a Ilha do Mel. Neste local a velocidade chega a 0,9 m/s.

**Tabela 10 – Elevação, módulo da velocidade de corrente e tensão no fundo no ponto de referência para os períodos selecionados para análise das distribuições espaciais – Cenário Prog-T – Inverno.**

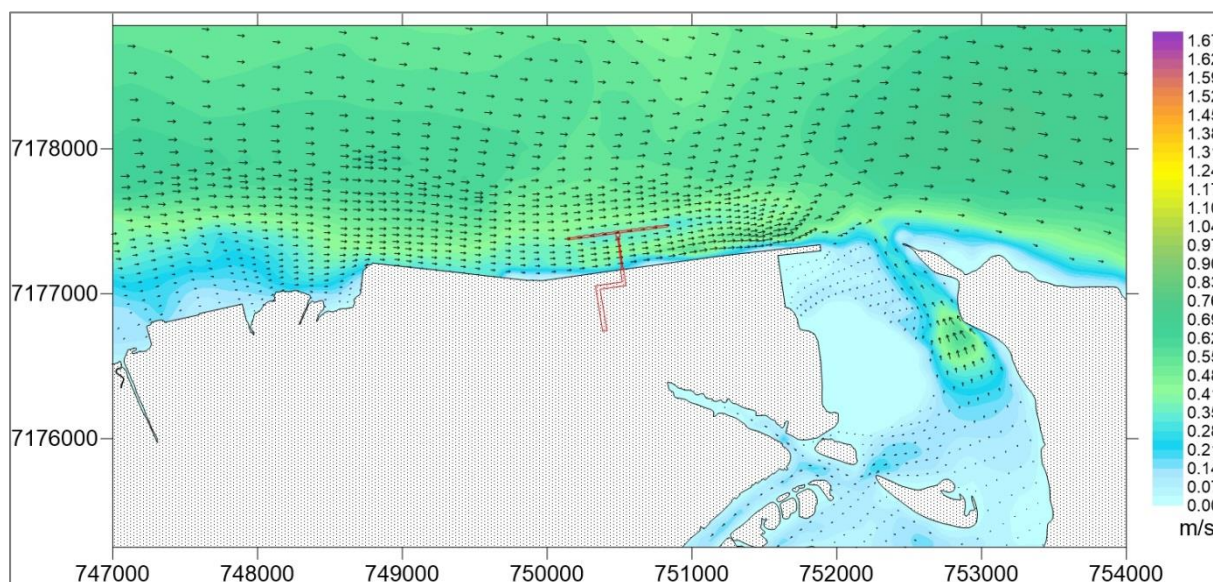
Situação		Dia do ciclo de maré e hora	Elevação (m)	Velocidade de corrente (m/s)	Tensão no fundo (N/m <sup>2</sup> )
Sizígia	Meia-maré Enchente	Dia 22 - 13:00	0,2081	0,6568	0,8506
	Meia-maré Vazante	Dia 24 - 8:00	-0,2635	0,5974	0,7107
	Preamar	Dia 22 - 16:00	1,1726	0,2265	0,0992
	Baixamar	Dia 23 - 10:00	-0,9322	0,2778	0,1560
Quadratura	Meia-maré Enchente	Dia 16 - 9:00	0,0098	0,1370	0,0372
	Meia-maré Vazante	Dia 16 - 13:00	-0,0071	0,3393	0,2280
	Preamar	Dia 16 - 11:00	0,3315	0,1813	0,0646
	Baixamar	Dia 16 - 14:00	-0,1474	0,2269	0,1023



**Figura 76 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de preamar – sizigia – Cenário Prog-T – Inverno. Acima, resultados para toda a baía; abaixo, zoom na área de interesse.**

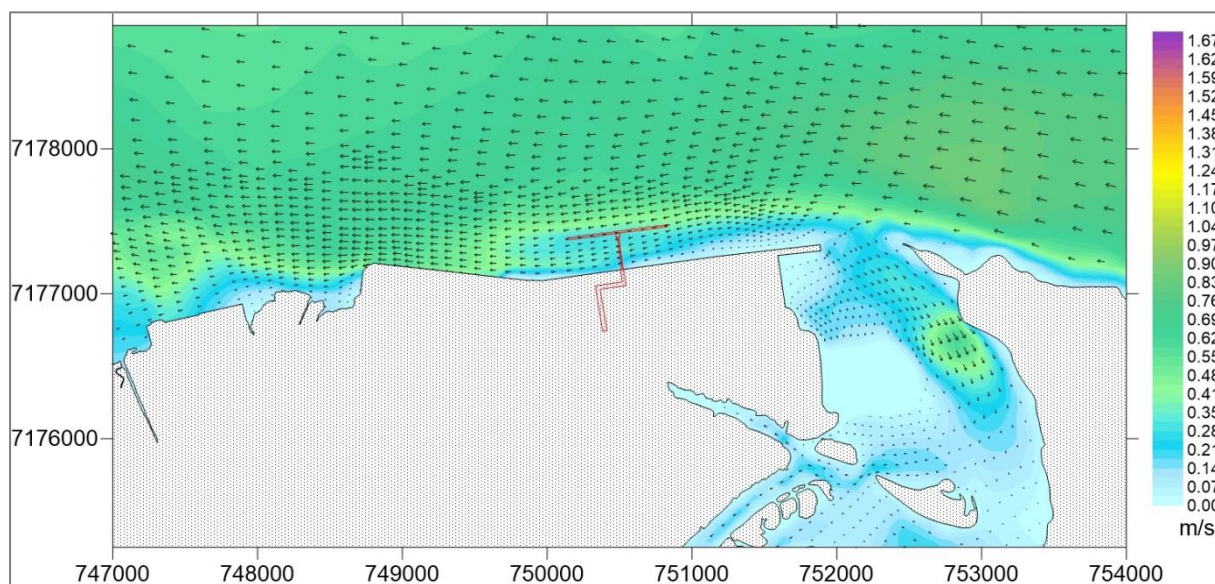


**Figura 77 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de baixamar – sizígia – Cenário Prog-T – Inverno.**



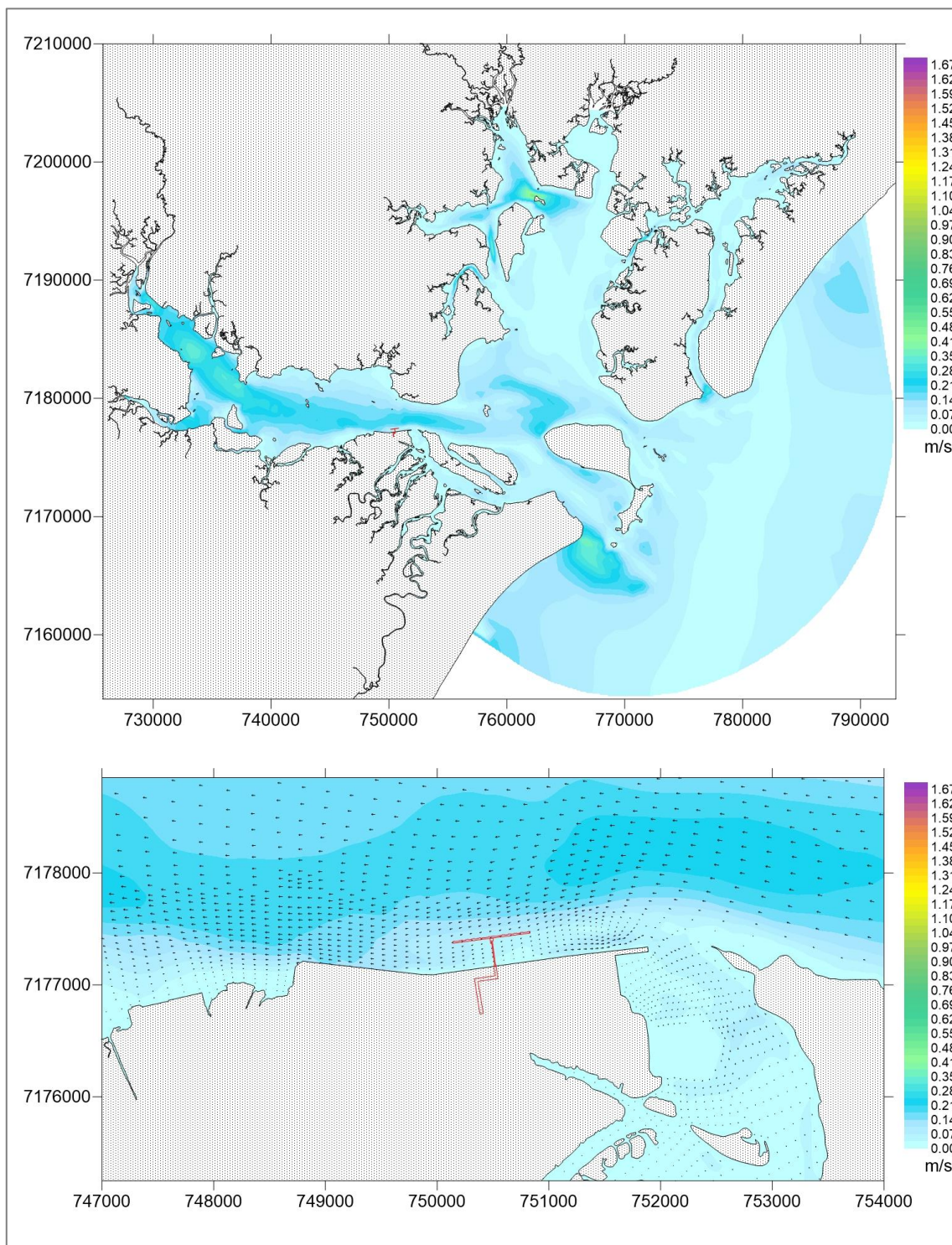
**Figura 78 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré vazante – sizígia – Cenário Prog-T – Inverno.**



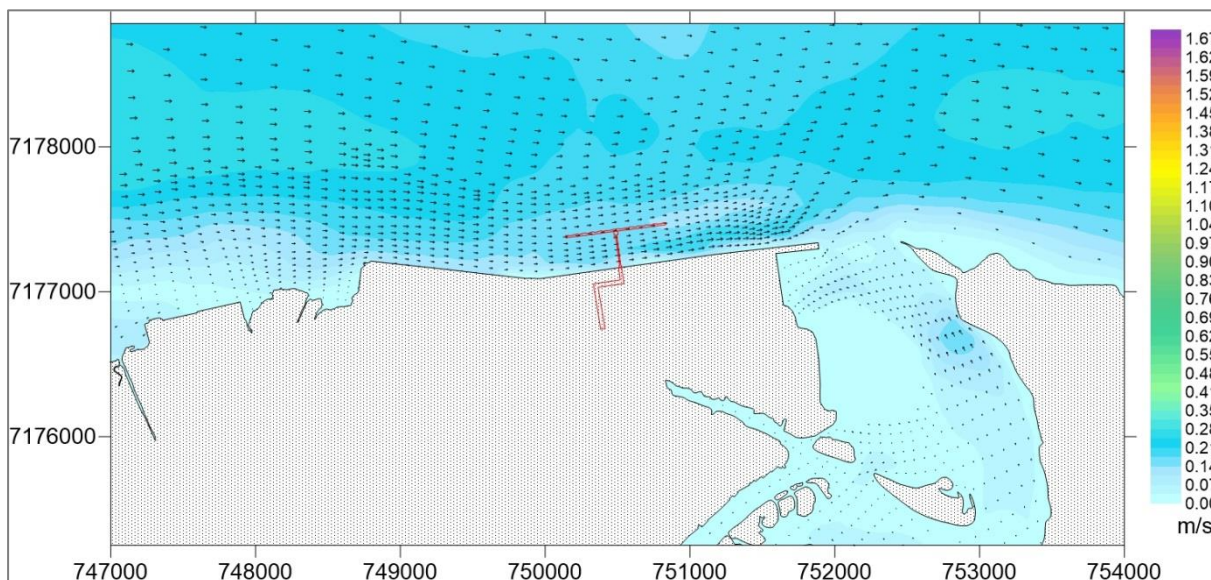


**Figura 79 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré enchente – sizigia – Cenário Prog-T – Inverno.**

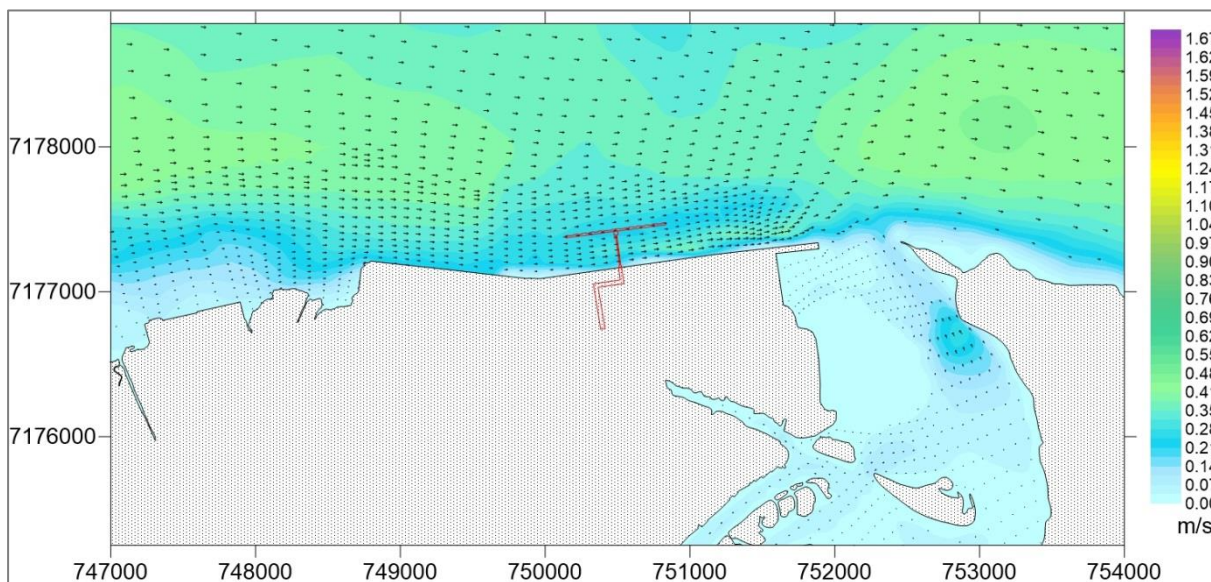




**Figura 80 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de preamar – quadratura – Cenário Prog-T – Inverno. Acima, resultados para toda a baía; abaixo, zoom na área de interesse.**

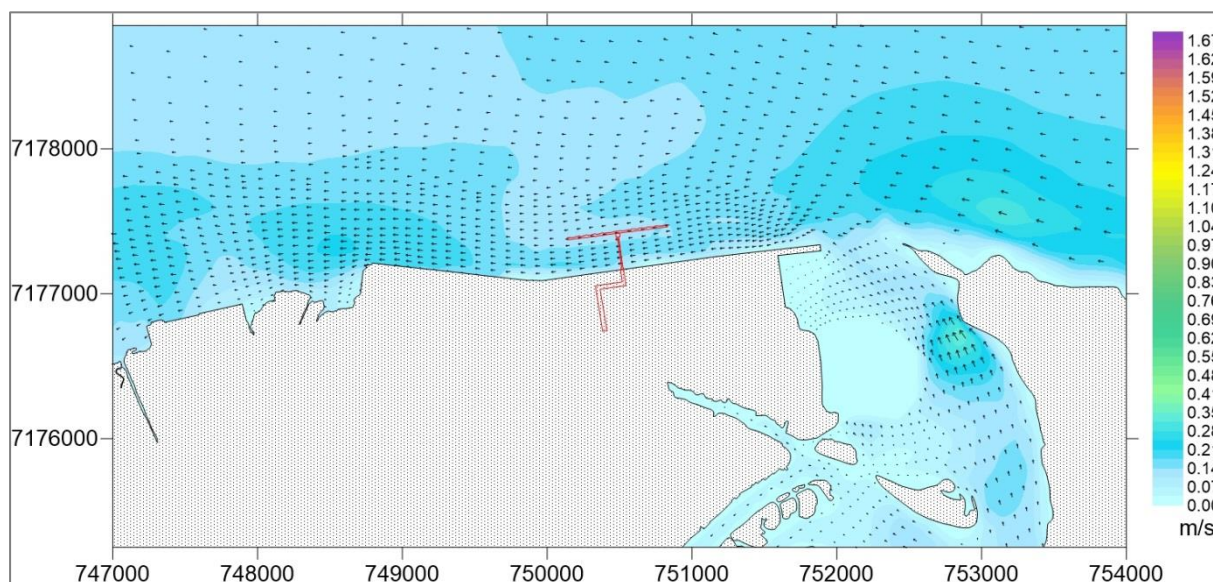


**Figura 81 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de baixamar – quadratura – Cenário Prog-T – Inverno.**



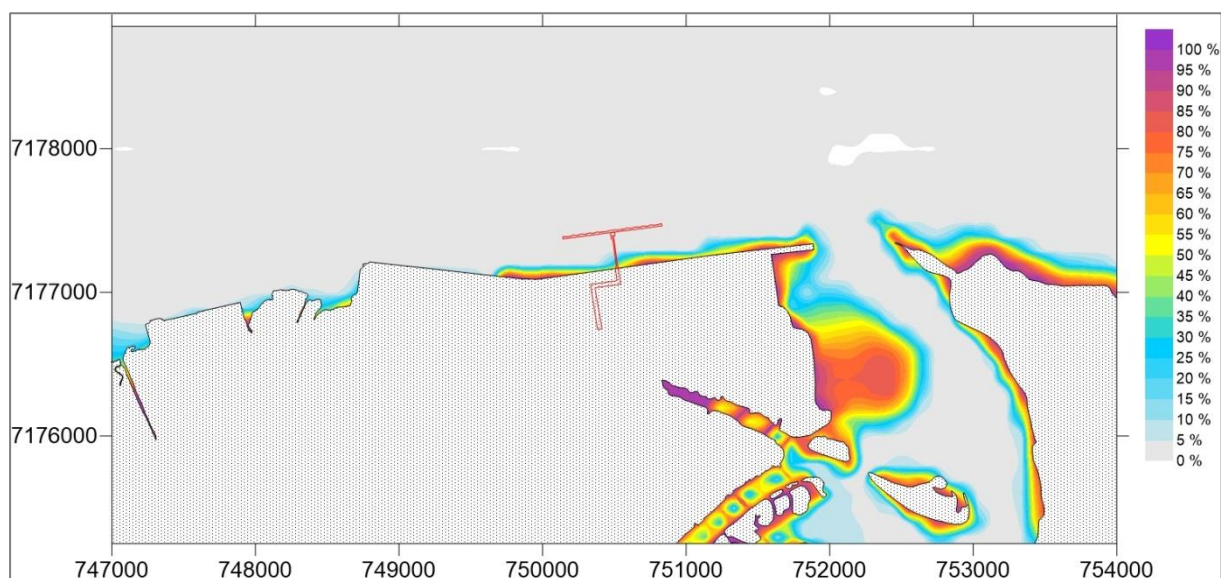
**Figura 82 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré vazante – quadratura – Cenário Prog-T – Inverno.**



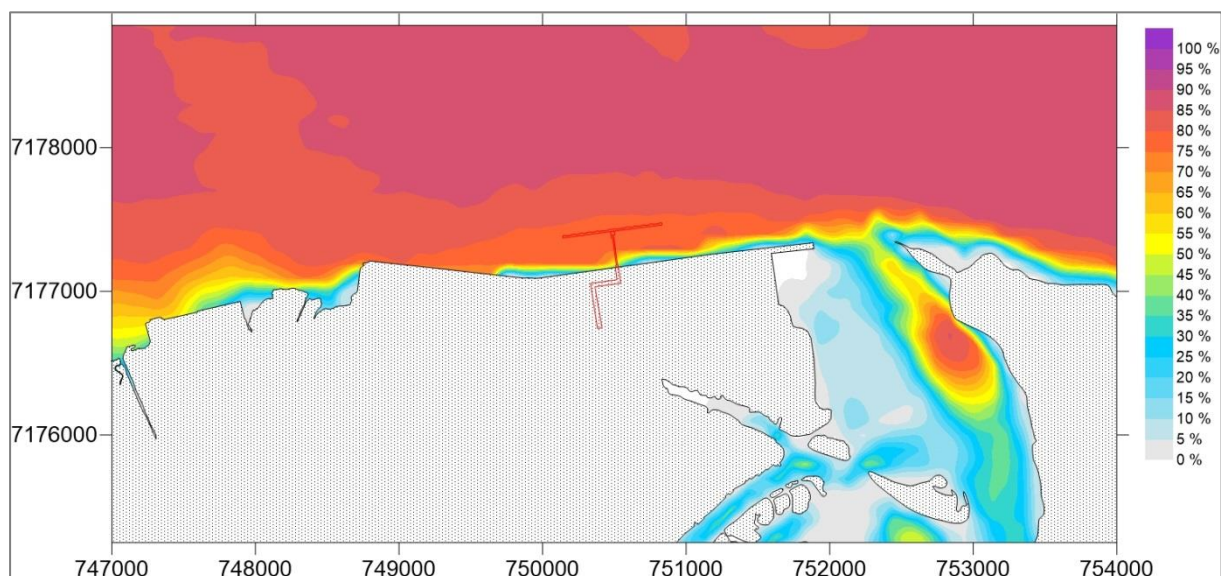


**Figura 83 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré enchente – quadratura – Cenário Prog-T – Inverno.**

A Figura 84 apresenta as probabilidades de que ocorram velocidades menores do que 0,01 m/s enquanto a Figura 85 apresenta as probabilidades de ocorrência de velocidades maiores do que 0,1 m/s durante um ciclo típico de maré de inverno – o comportamento observado é semelhante ao do cenário Prog-T – Verão: houve redução da probabilidade de ocorrência de velocidades maiores do que 0,1 m/s quando comparado com o Cenário Diag – Verão. Porém, quando comparadas às probabilidades do Cenário Prog-T – Verão, neste cenário os valores são maiores.



**Figura 84 – Probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente menores do que 0,01 m/s no Complexo Estuarino Paranaguá – Cenário Prog-T –Inverno.**

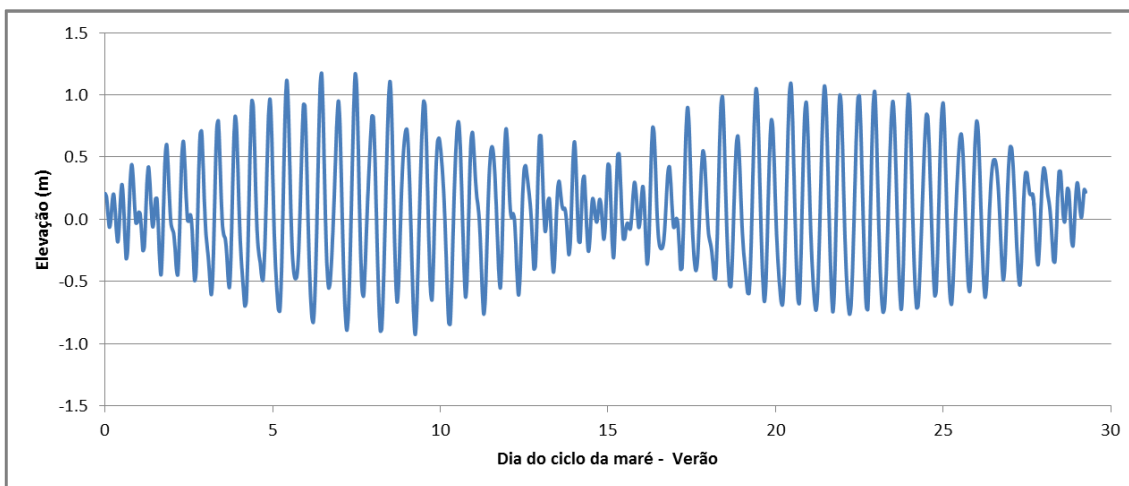


**Figura 85 – Probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente maiores do que 0,1 m/s no Complexo Estuarino Paranaguá – Cenário Prog-T – Inverno.**

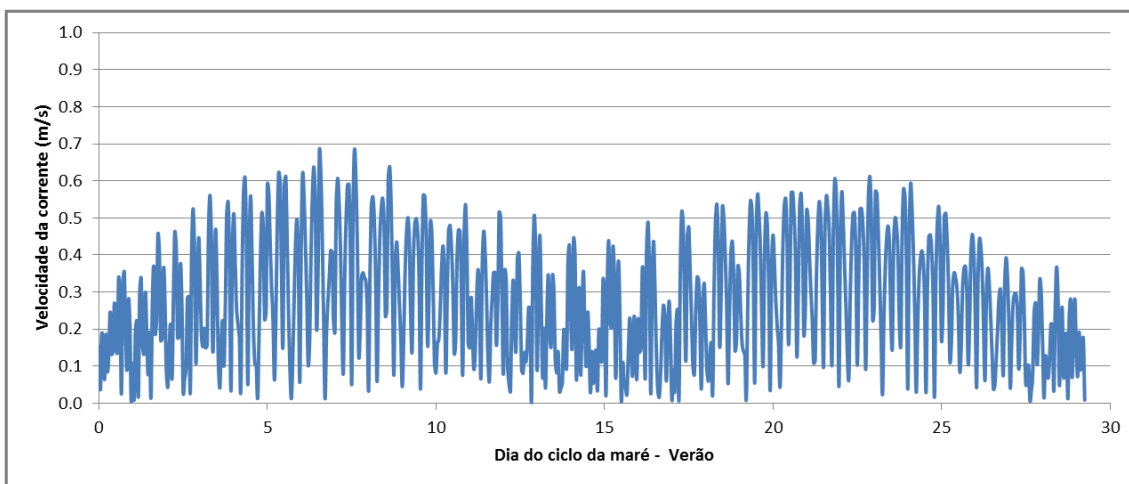
#### 1.4.5 Resultados de hidrodinâmica para o Cenário Prog-F-Verão

O cenário Prog-F acumula as alterações de batimetria referentes à implantação dos píeres T e F e de suas respectivas áreas de dragagem. Considerando as características referentes ao cenário de Verão, a Figura 86 apresenta a evolução temporal de elevação do nível da superfície livre no ponto de referência apresentado na Figura 59; para o mesmo ponto, a Figura 87 mostra a evolução temporal da velocidade de corrente e a Figura 88 mostra a tensão no fundo. Em termos de elevação, observa-se que os valores variam entre cerca de -0,9 m e 1,1 m, sendo bem semelhantes aos registrados no Cenário Prog-T na mesma estação. Já para as velocidades de corrente e módulo de tensão de fundo nota-se que houve redução nos valores quando comparados com os cenários anteriores – aqui as velocidades atingem valores da ordem de 0,6 m/s enquanto o módulo de tensão, com exceção de alguns pontos, não ultrapassa 0,7 N/m<sup>2</sup>.

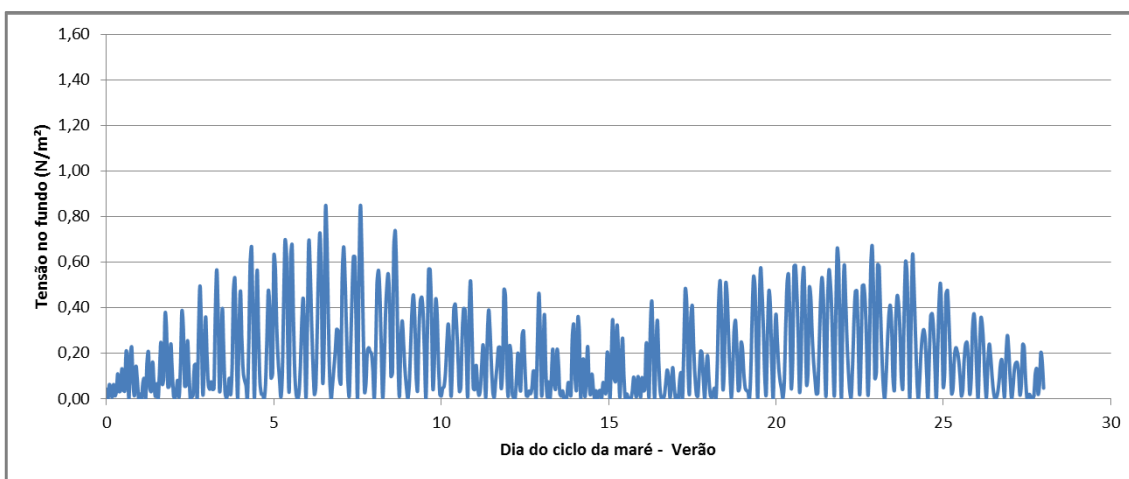






**Figura 86 – Série temporal de elevação – Cenário Prog-F – Verão.**



**Figura 87 – Série temporal de velocidade de corrente – Cenário Prog-F – Verão.**



**Figura 88 – Série temporal de tensão no fundo – Cenário Prog-F – Verão.**

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	101

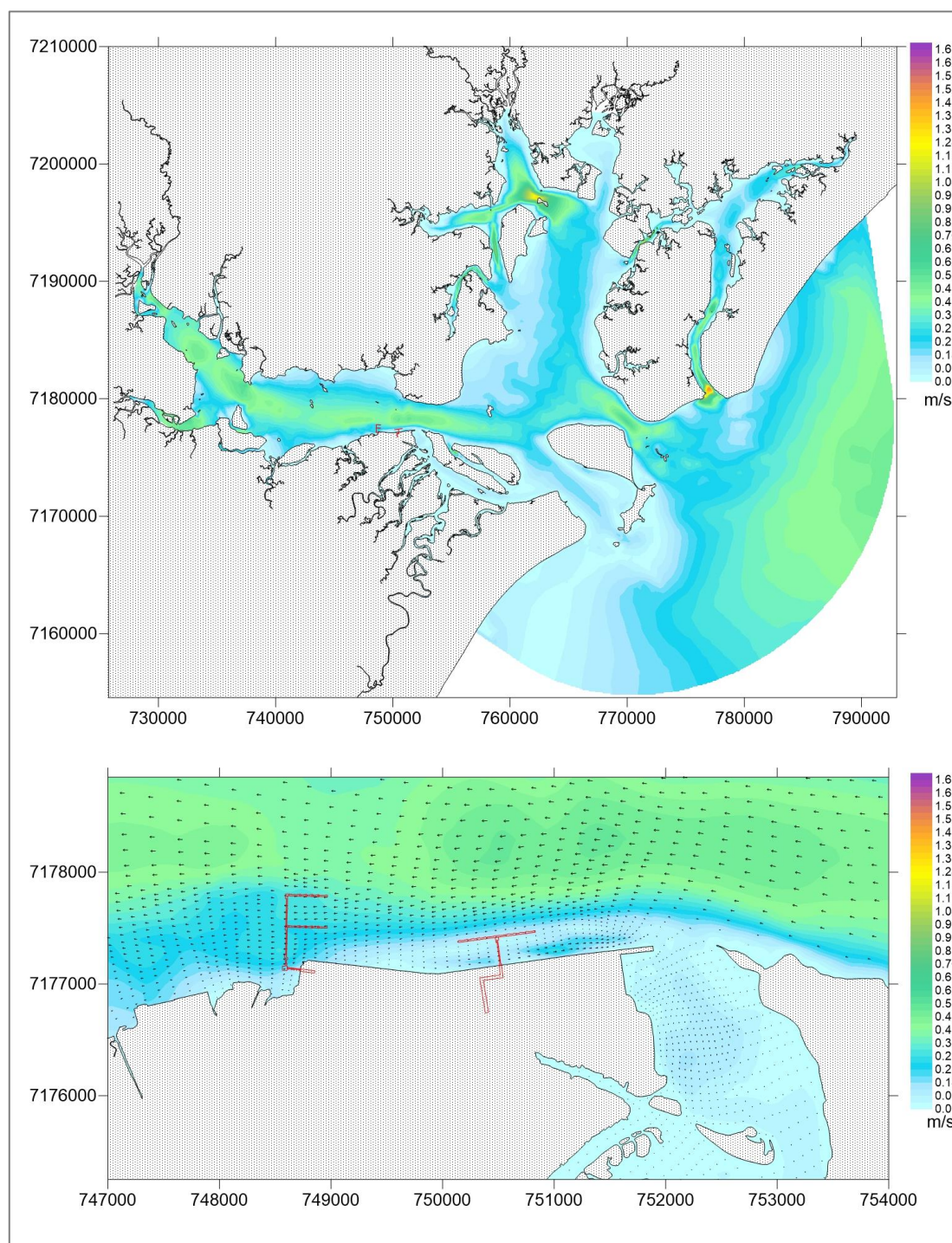
A Tabela 11 apresenta os momentos para os quais serão analisados os resultados espaciais, bem como os valores de elevação, velocidade de corrente e tensão no fundo para o ponto de referência. As distribuições espaciais das velocidades de corrente (referentes aos momentos da Tabela 11) são apresentadas da Figura 89 até a Figura 96 – os vetores indicam as direções das velocidades de corrente. Na área de interesse, em sizígia, para as situações de meia-maré enchente e meia-maré vazante as velocidades de corrente estão em torno de 0,90 m/s, enquanto que, para preamar são de 0,5 m/s e em baixamar não atingem 0,3 m/s. Na mesma região, em quadratura, predominam velocidades da ordem de 0,5 m/s.

**Tabela 11 – Elevação, módulo da velocidade de corrente e tensão no fundo no ponto de referência para os períodos selecionados para análise das distribuições espaciais – Cenário Prog-F – Verão.**

Situação		Dia do ciclo de maré e hora	Elevação (m)	Velocidade de corrente (m/s)	Tensão no fundo (N/m <sup>2</sup> )
Sizígia	Meia-maré Enchente	Dia 8 - 2:00	-0,0335	0,4933	0,4400
	Meia-maré Vazante	Dia 8 - 7:00	0,1549	0,6851	0,8468
	Preamar	Dia 8 - 4:00	1,1685	0,4187	0,3124
	Baixamar	Dia 7 - 22:00	-0,8922	0,2162	0,0856
Quadratura	Meia-maré Enchente	Dia 14 - 22:00	0,0575	0,2756	0,1373
	Meia-maré Vazante	Dia 15 - 2:00	-0,1176	0,3561	0,2296
	Preamar	Dia 14 - 23:00	0,3119	0,3093	0,1724
	Baixamar	Dia 14 - 20:00	-0,1710	0,3988	0,2882

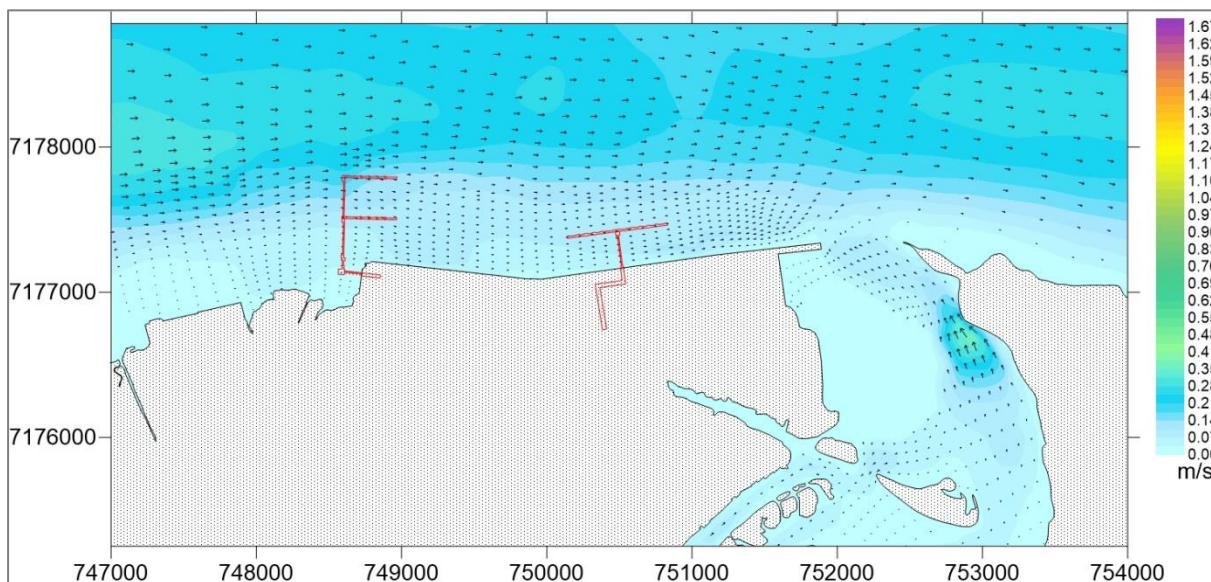
Para o cenário Verão, as probabilidades de ocorrência de velocidades menores do que 0,01 m/s são apresentadas na Figura 97 enquanto as probabilidades de ocorrência de velocidades maiores do que 0,1 m/s são apresentadas na Figura 98 – ambas consideram um período de um ciclo de maré típico de verão. Em comparação ao cenário Prog-T – Verão, observa-se que há uma redução nas probabilidades de ocorrência de velocidades superiores a 0,1 m/s na

área de interesse, principalmente na região do canal de acesso onde há alteração de batimetria – nessa área a probabilidade de ocorrência de velocidades maiores passa de 90% para 75% do tempo. Para níveis menores de velocidade ( $< 0,01$  m/s) não foram observadas diferenças.

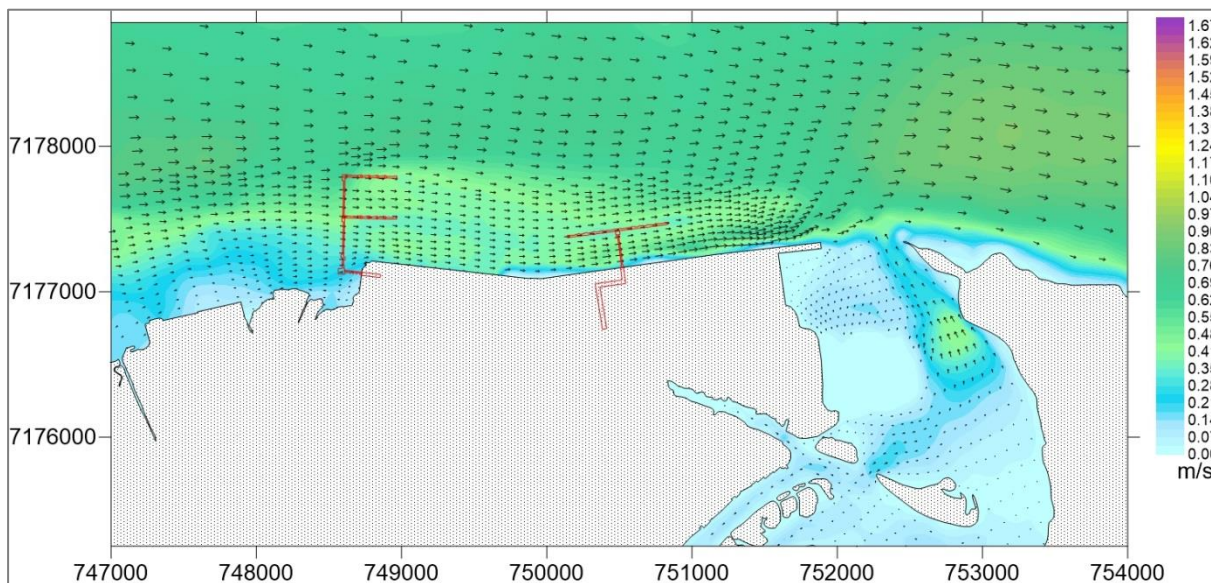


**Figura 89 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de preamar – sizígia – Cenário Prog-F – Verão. Acima, resultados para toda a baía; abaixo, zoom na área de interesse.**

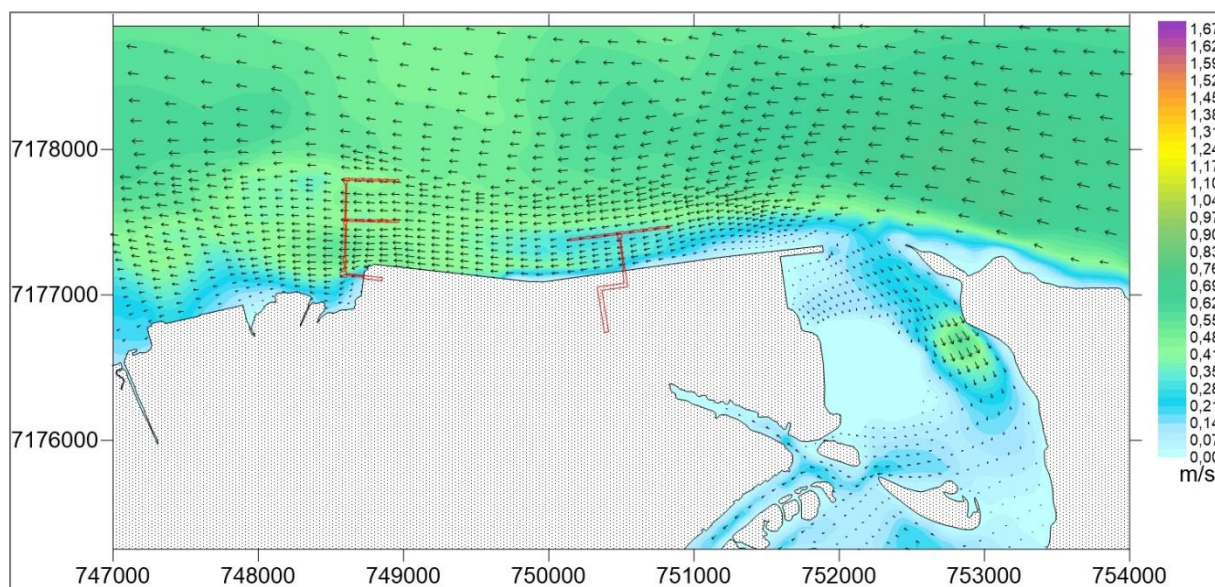




**Figura 90 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de baixamar – sizigia – Cenário Prog-F – Verão.**

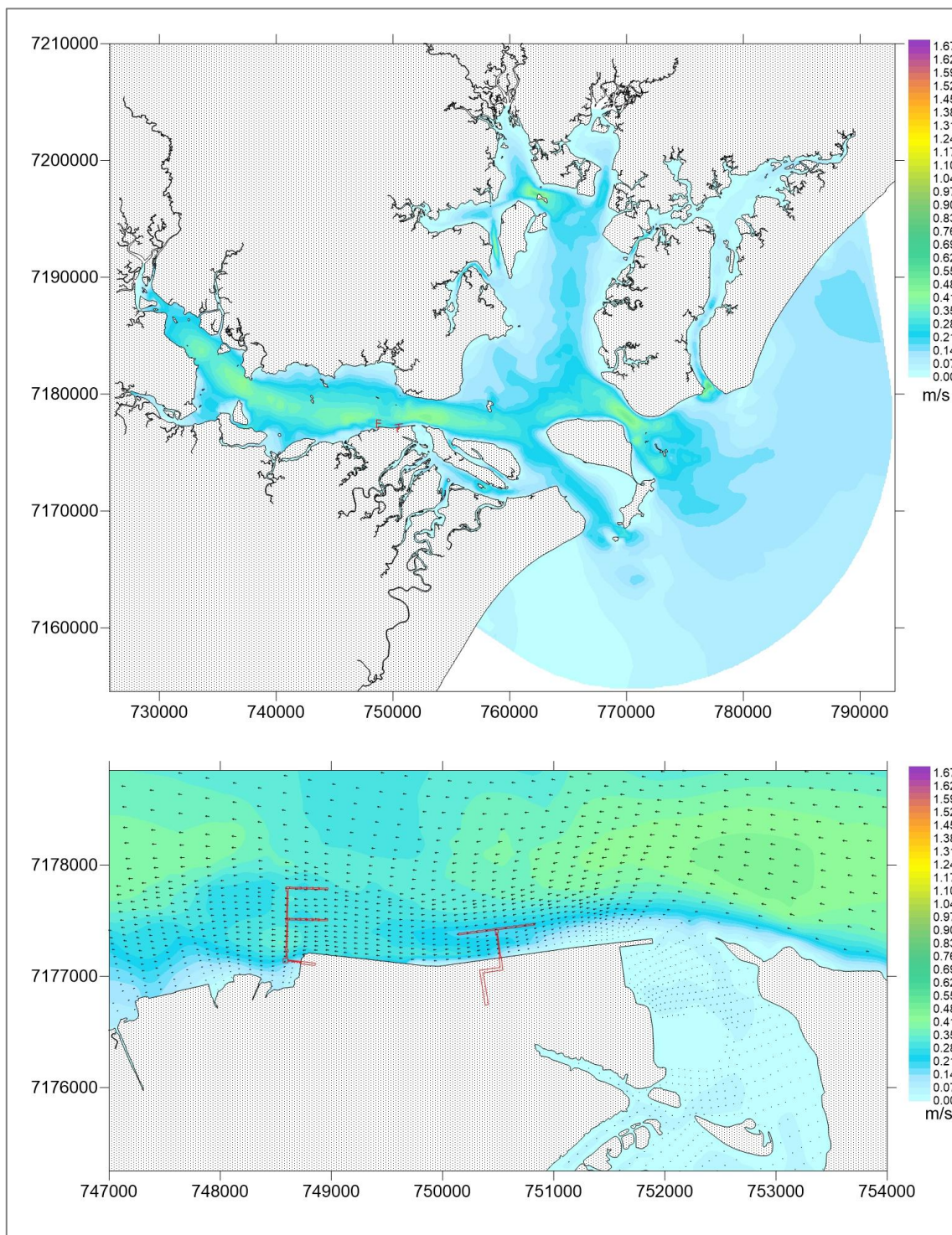


**Figura 91 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré vazante – sizigia – Cenário Prog-F – Verão.**

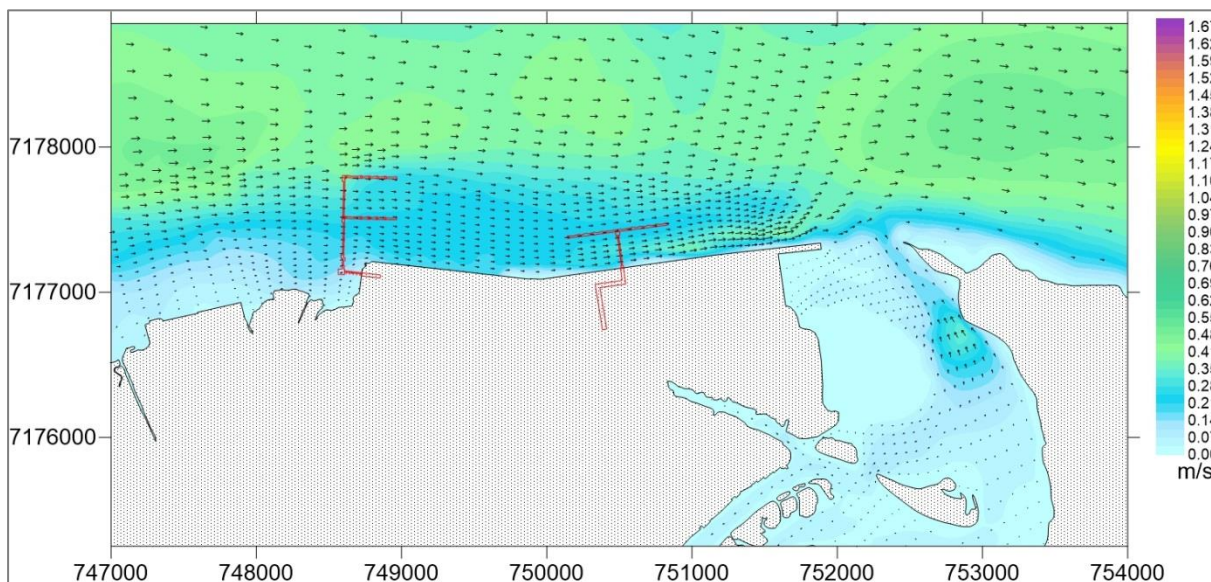


**Figura 92 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré enchente – sizígia – Cenário Prog-F – Verão.**

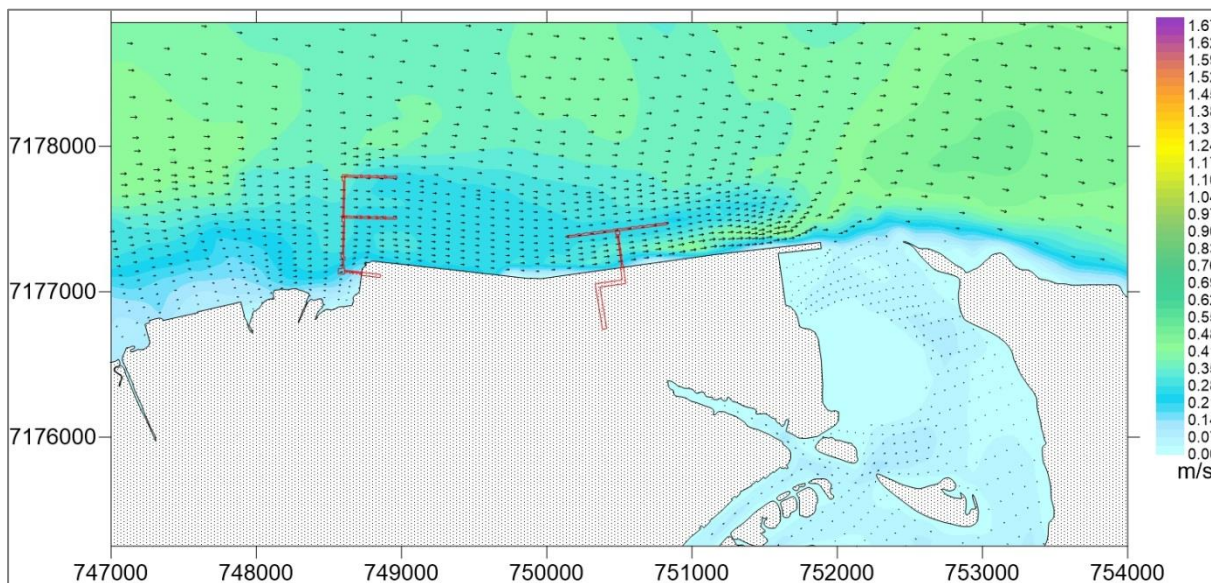




**Figura 93 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de preamar – quadratura – Cenário Prog-F – Verão. Acima, resultados para toda a baía; abaixo, zoom na área de interesse.**

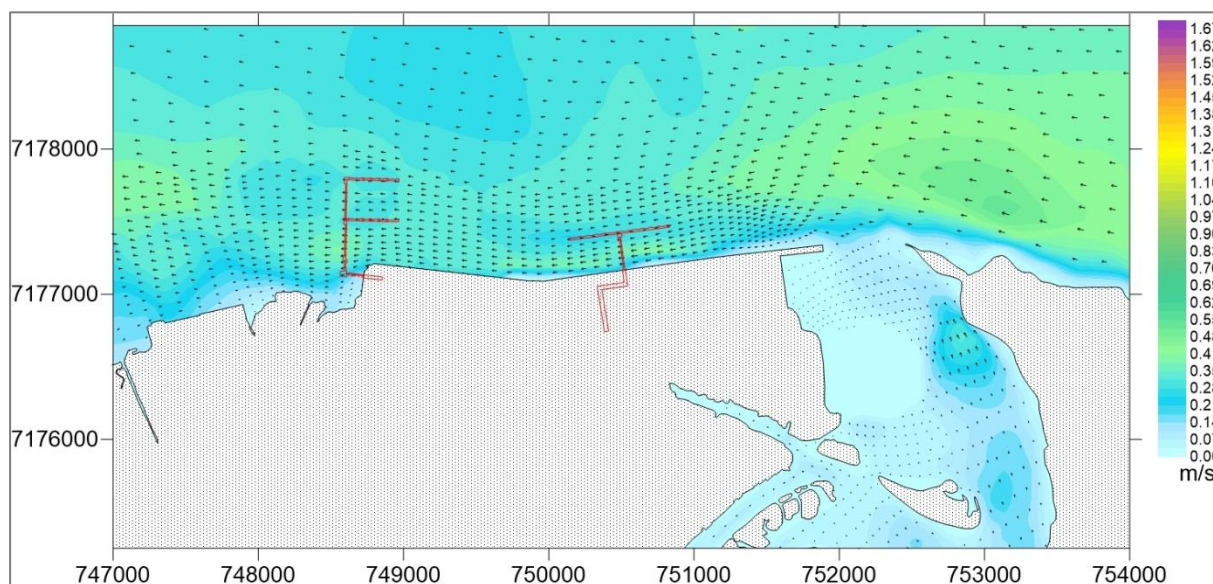


**Figura 94 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de baixamar – quadratura – Cenário Prog-F – Verão.**

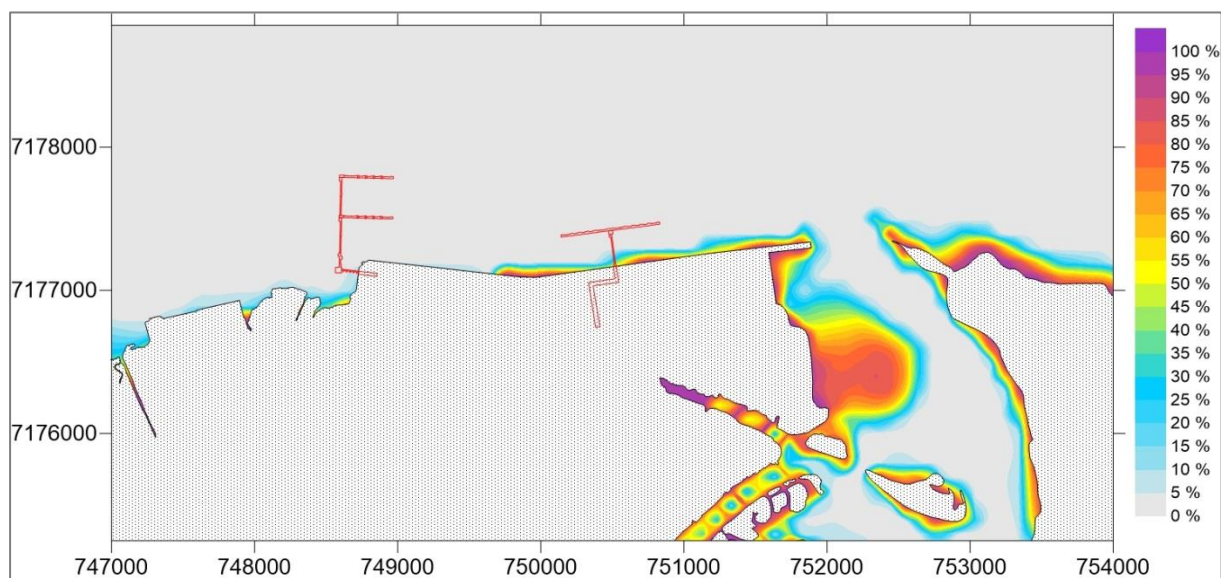


**Figura 95 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré vazante – quadratura – Cenário Prog-F – Verão.**

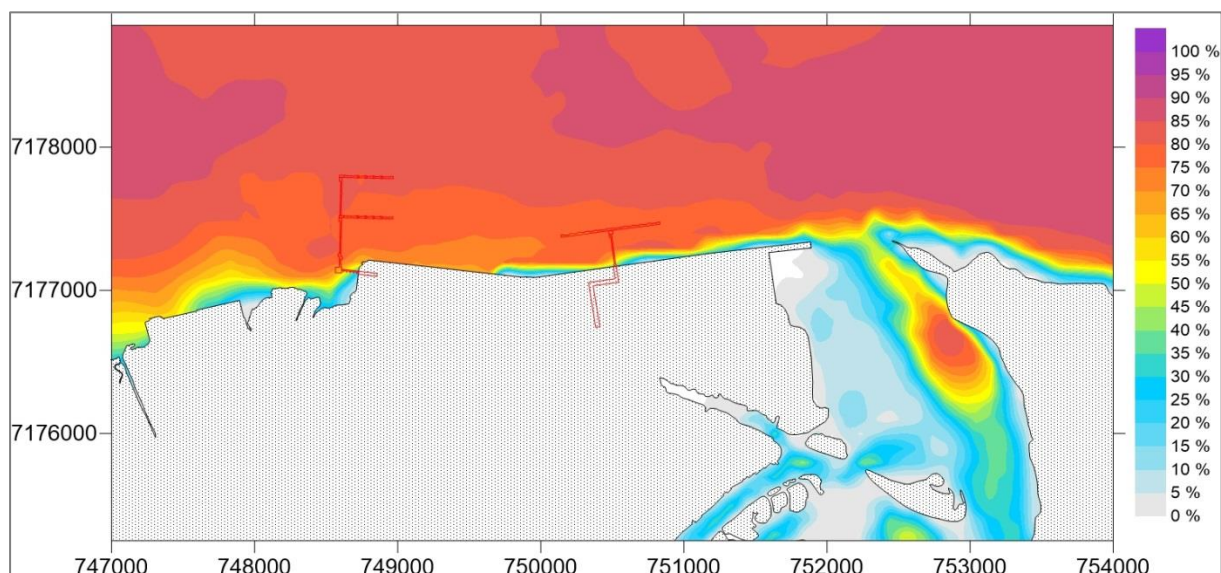




**Figura 96 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré enchente – quadratura – Cenário Prog-F – Verão.**



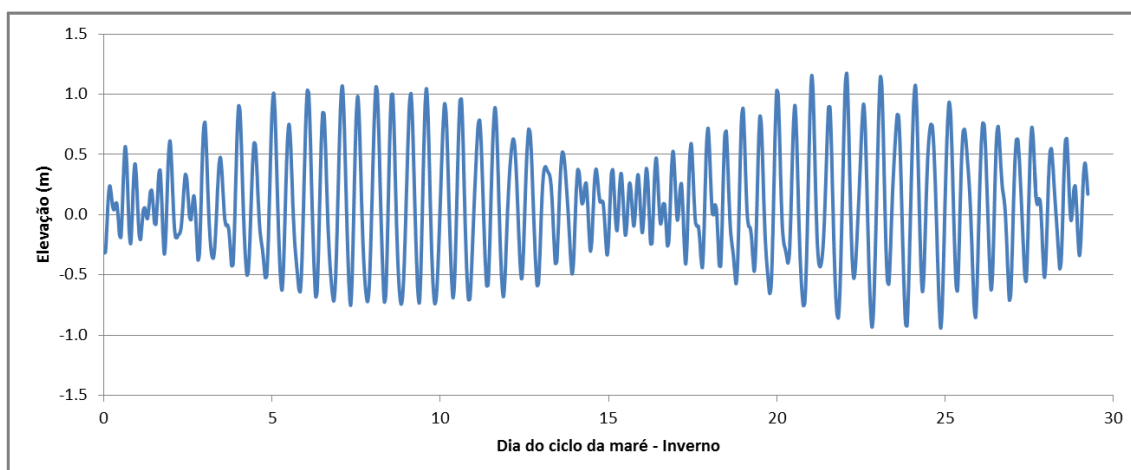
**Figura 97 – Probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente menores do que 0,01 m/s no Complexo Estuarino Paranaguá – Cenário Prog-F – Verão.**



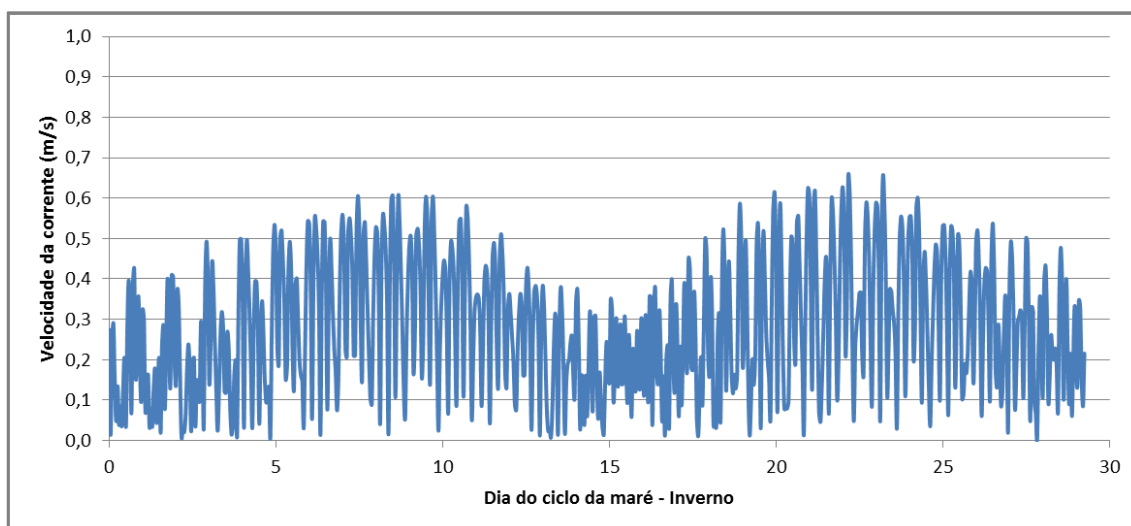
**Figura 98 – Probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente maiores do que 0,1 m/s no Complexo Estuarino Paranaguá – Cenário Prog-F – Verão.**

#### 1.4.6 Resultados de hidrodinâmica para o Cenário Prog-F-Inverno

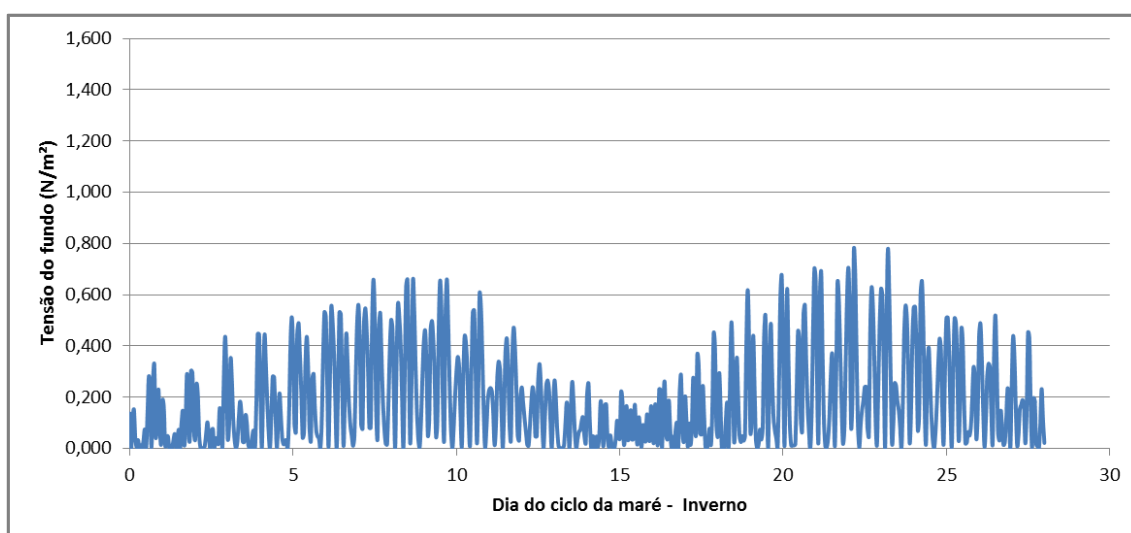
Para o Cenário Prog-F – Inverno, as séries temporais para o ponto de referência são apresentadas na Figura 99, na Figura 100 e na Figura 101 – respectivamente elevação da superfície livre, velocidade de corrente e tensão no fundo. As amplitudes dos valores observados são semelhantes àquelas do cenário anterior – a elevação da superfície livre varia entre -0,9 m e 1,1 m, enquanto as velocidades de corrente máximas e o módulo de tensão no fundo máximo (que em geral ocorrem em conjunto com as maiores elevações), são da ordem de 0,6 m/s e 0,7 N/m<sup>2</sup>, respectivamente.



**Figura 99 – Série temporal de elevação – Cenário Prog-F – Inverno.**





**Figura 100 – Série temporal de velocidade de corrente – Cenário Prog-F – Inverno.**



**Figura 101 – Série temporal de tensão no fundo – Cenário Prog-F – Inverno.**

A Tabela 12 apresenta os tempos e respectivos valores de elevação, velocidade de corrente e tensão no fundo para os quais serão analisadas as distribuições espaciais. Os valores apresentados nessa tabela são os resultados obtidos para o ponto de referência da Figura 32. As distribuições espaciais das velocidades de corrente são apresentadas da Figura 102 até a Figura 109, e de maneira geral são bastante semelhantes aos do cenário Prog-F – Verão. Em sizígia, para as situações de meia-maré vazante e enchente, as velocidades de corrente máximas são da ordem de 0,90 m/s. Para baixamar e preamar, as velocidades máximas são da ordem de 0,5 m/s. Para quadratura, predominam velocidades menores do que 0,5 m/s; esse mesmo valor também ocorre para a meia-maré vazante.

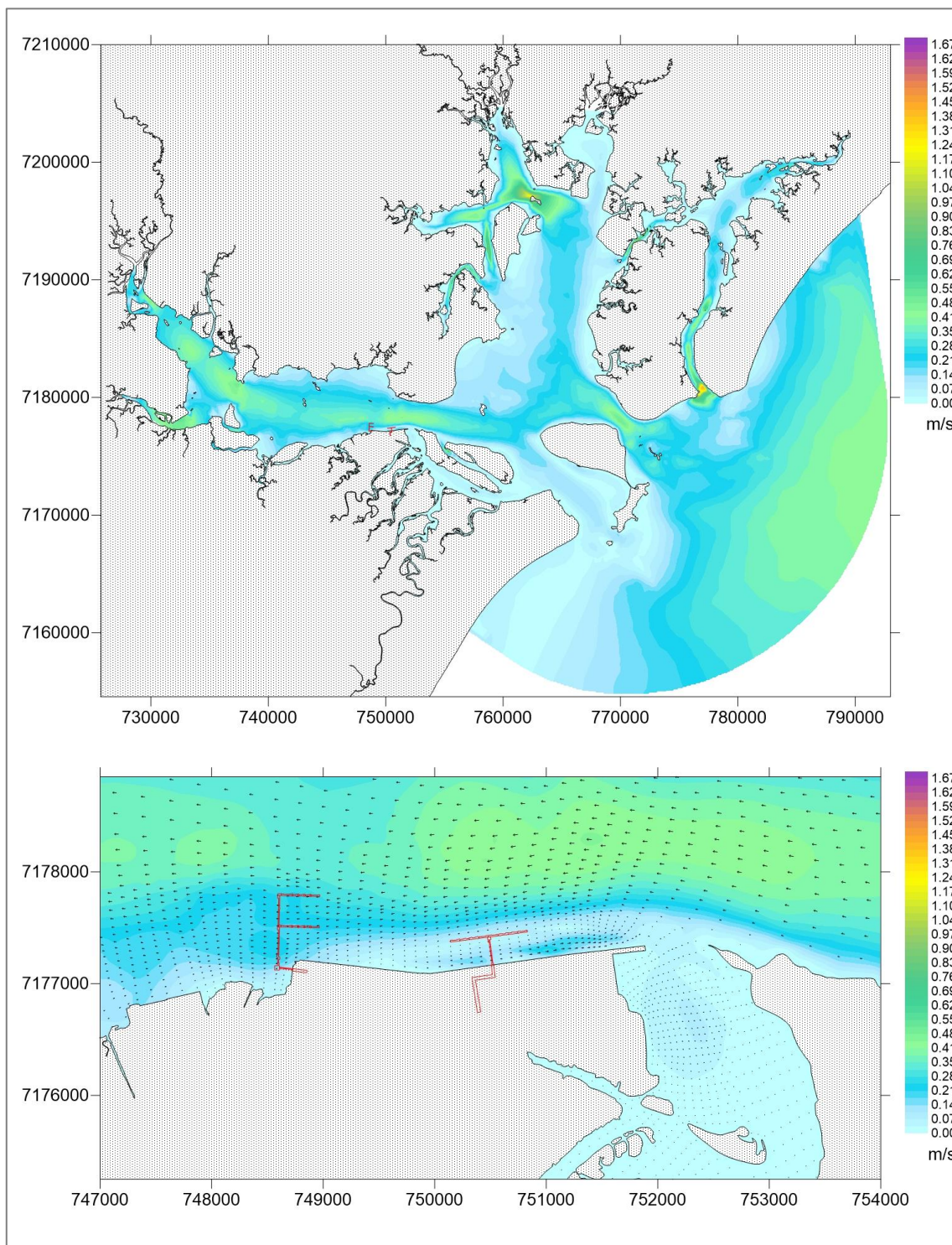


 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	110

**Tabela 12 – Elevação, módulo da velocidade de corrente e tensão no fundo no ponto de referência para os períodos selecionados para análise das distribuições espaciais – Cenário Prog-F – Inverno.**

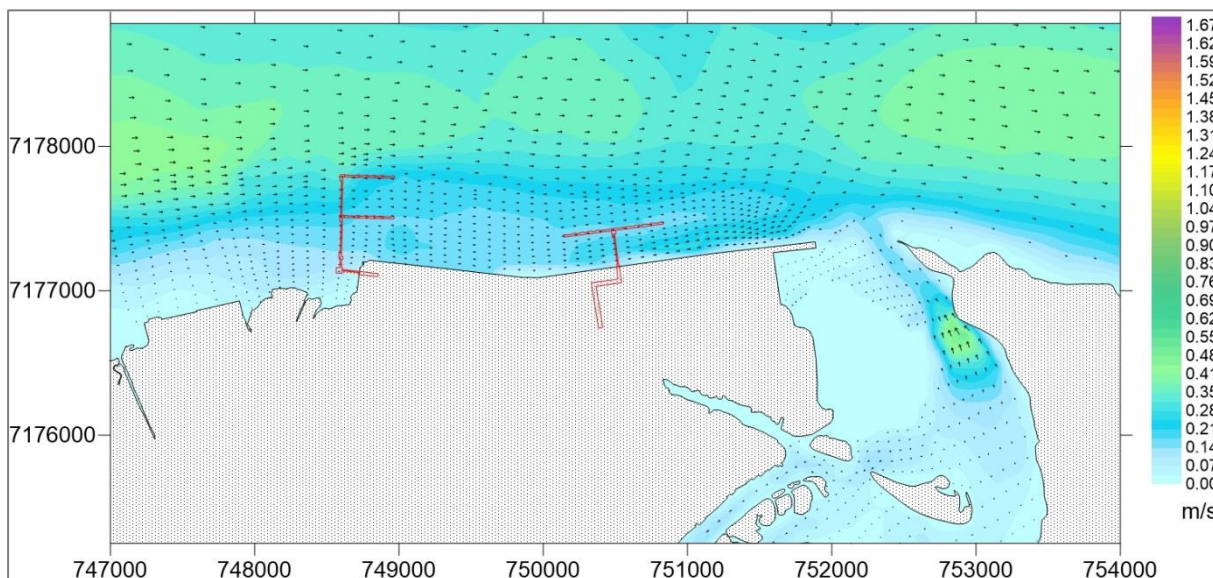
Situação		Dia do ciclo de maré e hora	Elevação (m)	Velocidade de corrente (m/s)	Tensão no fundo (N/m <sup>2</sup> )
Sizígia	Meia-maré Enchente	Dia 8 - 13:00	0,0326	0,4580	0,3791
	Meia-maré Vazante	Dia 8 - 20:00	-0,1577	0,5322	0,5131
	Preamar	Dia 8 - 16:00	1,0609	0,3533	0,2226
	Baixamar	Dia 8 - 22:00	-0,7241	0,3371	0,2075
Quadratura	Meia-maré Enchente	Dia 15 - 21:00	0,0173	0,1741	0,0548
	Meia-maré Vazante	Dia 16 - 1:00	-0,0260	0,3071	0,1705
	Preamar	Dia 15 - 23:00	0,3442	0,1395	0,0350
	Baixamar	Dia 16 - 2:00	-0,1701	0,2032	0,0748

As probabilidades de ocorrência de velocidades menores do que 0,01 m/s encontram-se na Figura 110; para velocidades de corrente maiores do que 0,1 m/s, as probabilidades de ocorrência encontram-se na Figura 111. Em ambos os casos considera-se um período de um ciclo de maré típico de inverno. Resultados semelhantes aos do cenário de Verão são observados – há redução na área em que as probabilidades de altas velocidades são maiores de 90%, principalmente no entorno da área de construção do píer F.

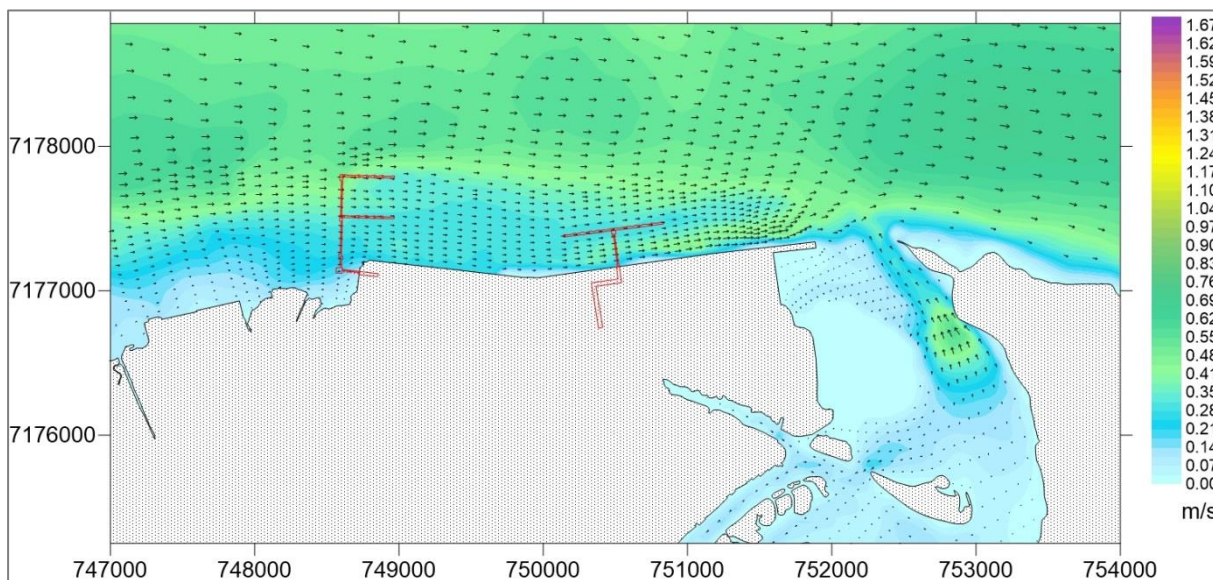


**Figura 102 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de preamar – sizígia – Cenário Prog-F – Inverno. Acima, resultados para toda a Baía; abaixo, zoom na área de interesse.**



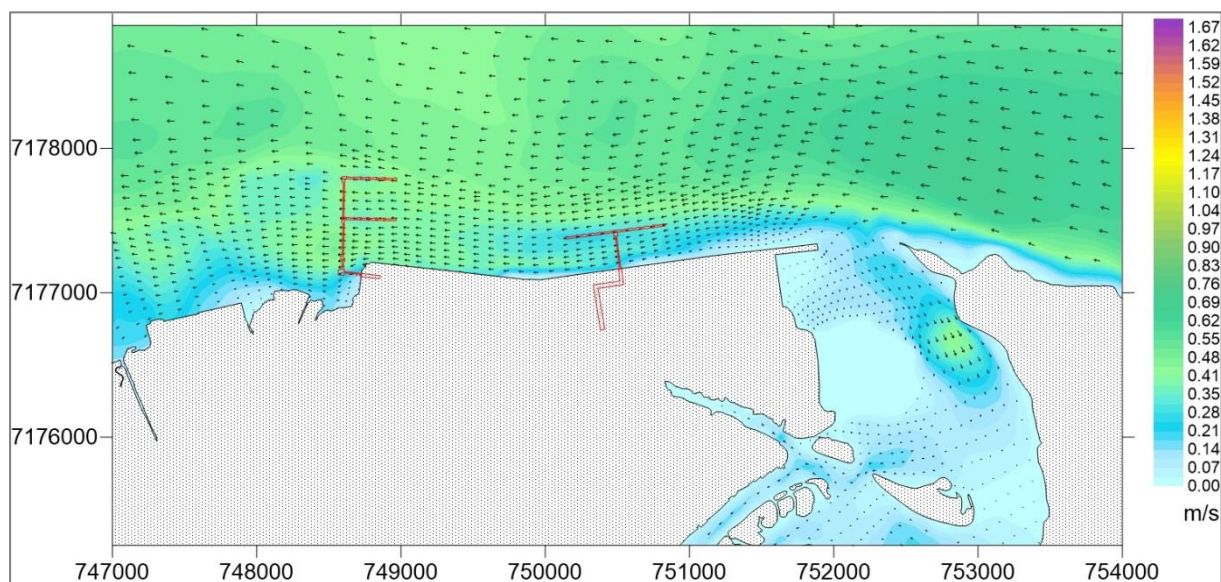


**Figura 103 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de baixamar – sizígia – Cenário Prog-F – Inverno.**

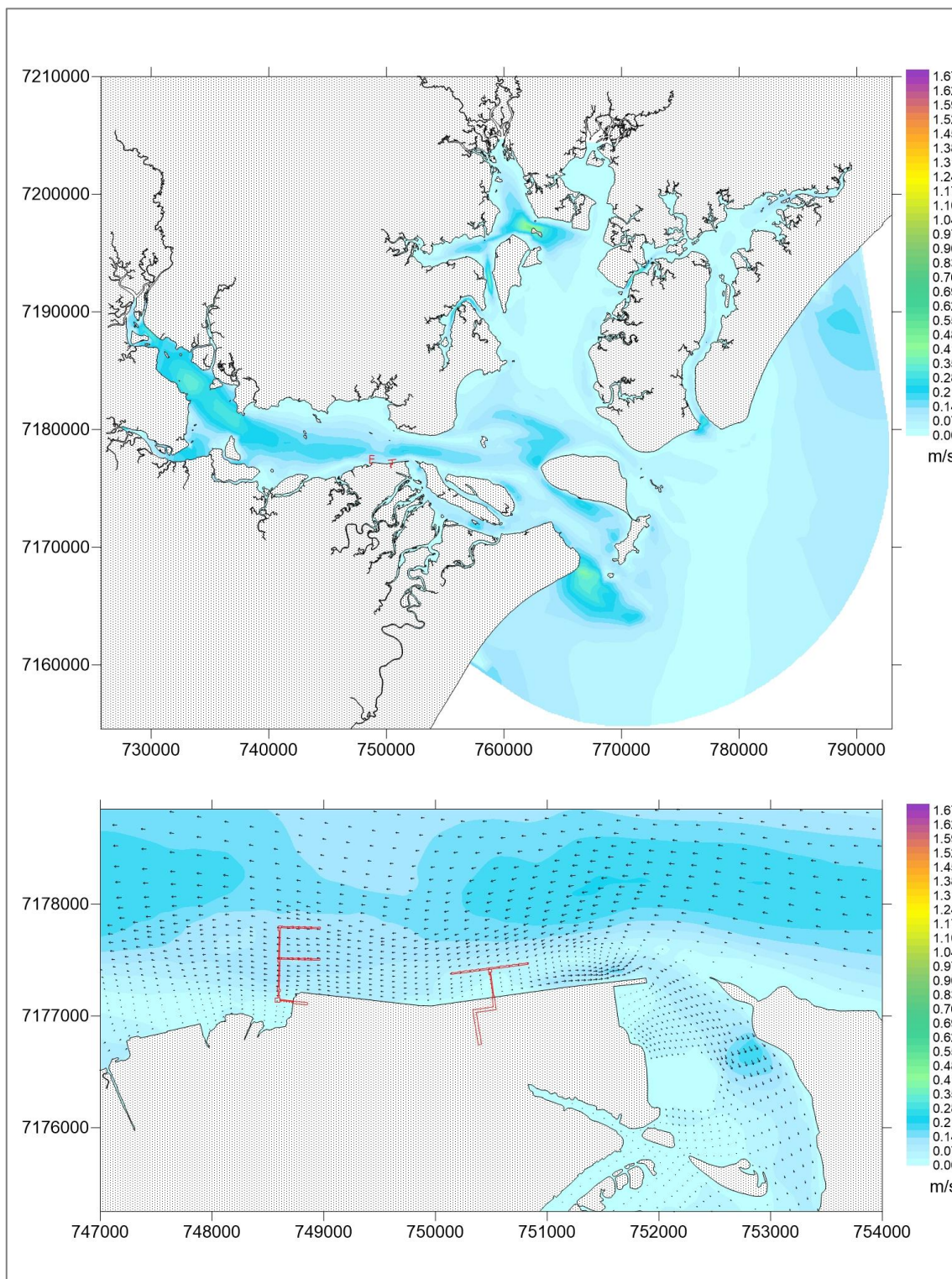


**Figura 104 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré vazante – sizígia – Cenário Prog-F – Inverno.**



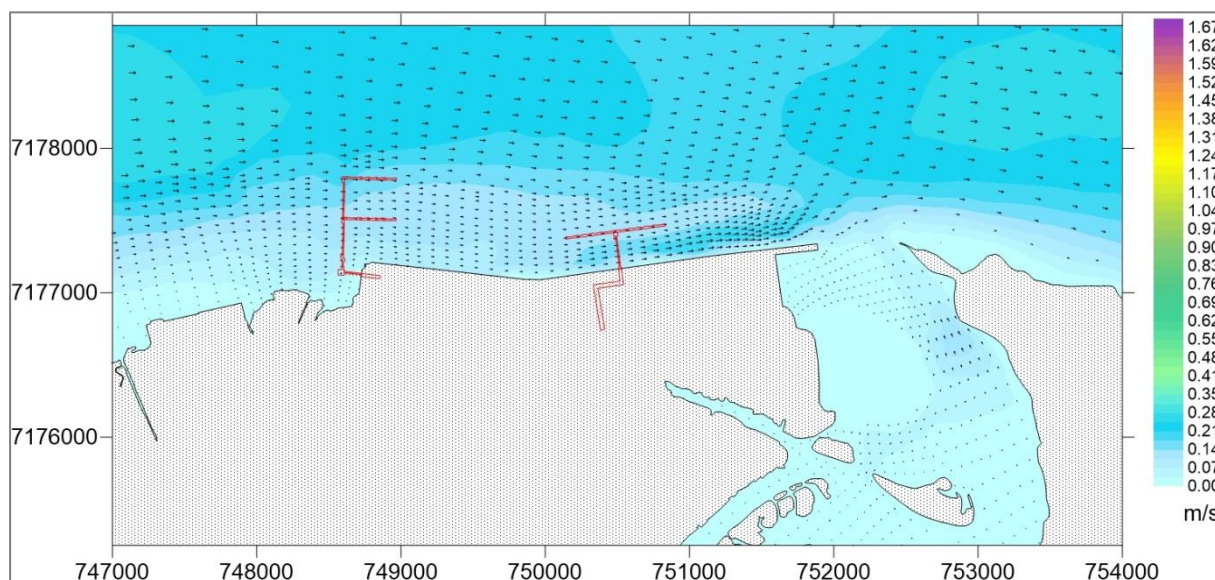


**Figura 105 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré enchente – sizígia – Cenário Prog-F – Inverno.**

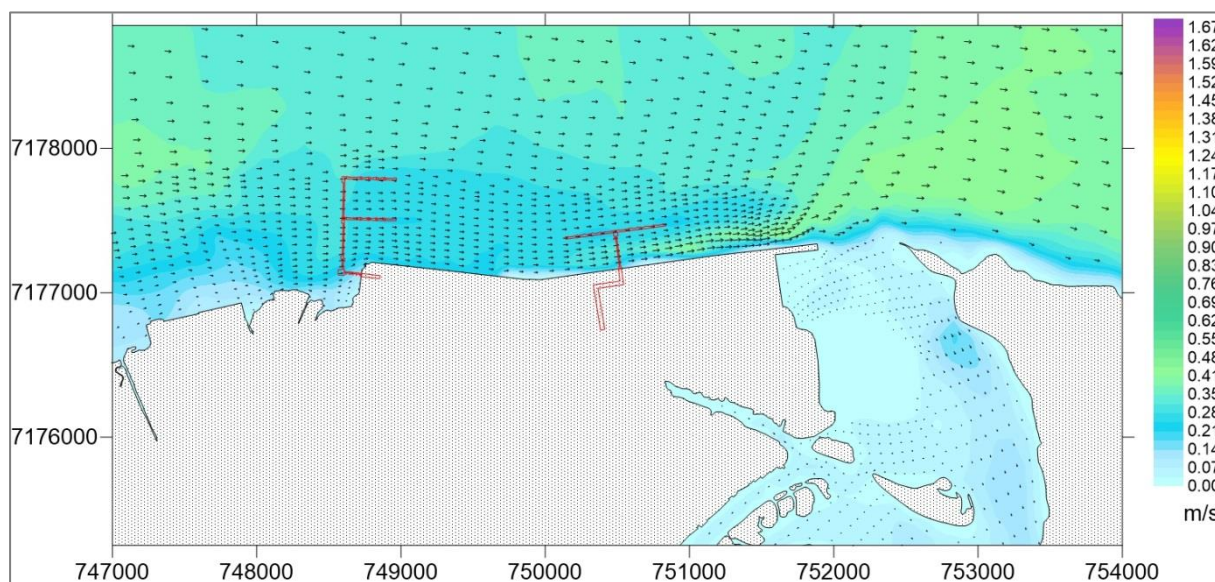


**Figura 106 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de preamar – quadratura – Cenário Prog-F – Inverno. Acima, resultados para toda a baía; abaixo, zoom na área de interesse.**



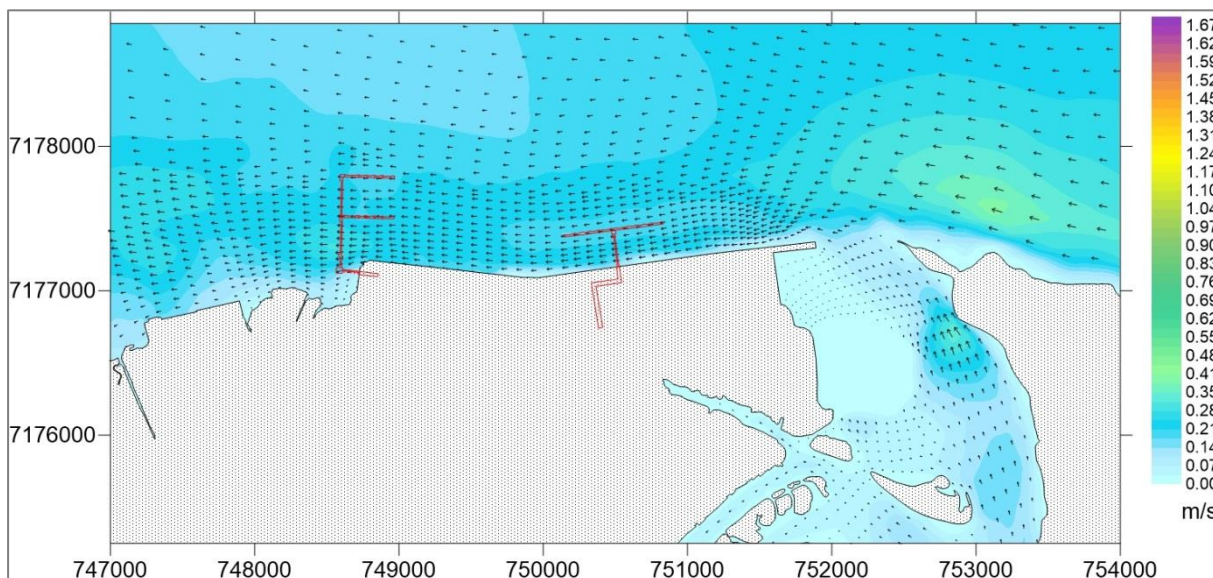


**Figura 107 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de baixamar – quadratura – Cenário Prog-F – Inverno.**

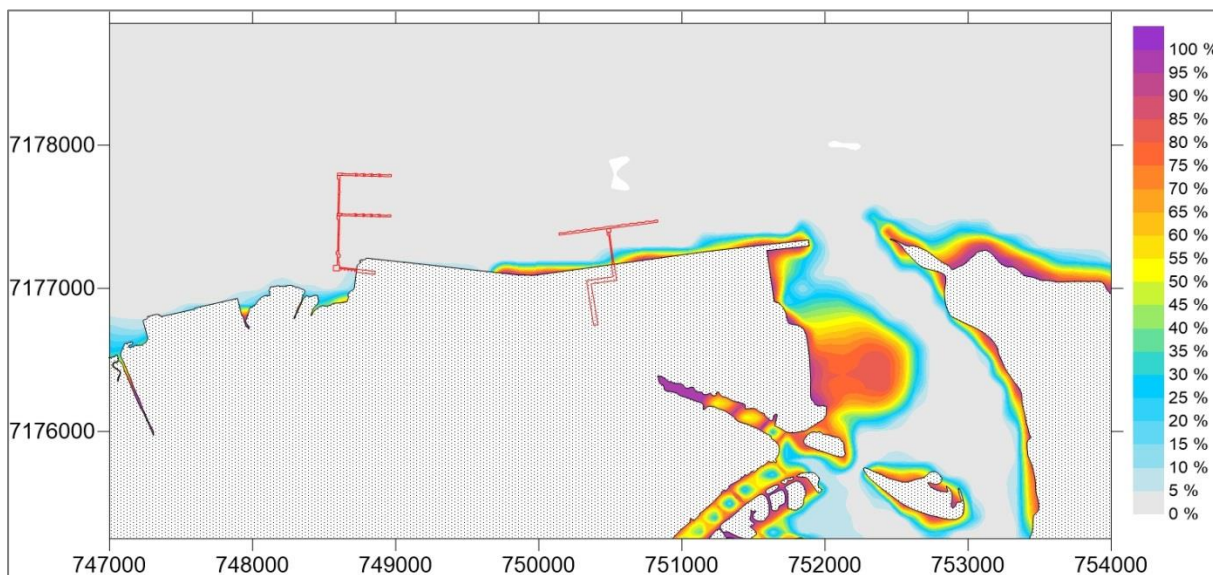


**Figura 108 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré vazante – quadratura – Cenário Prog-F – Inverno.**

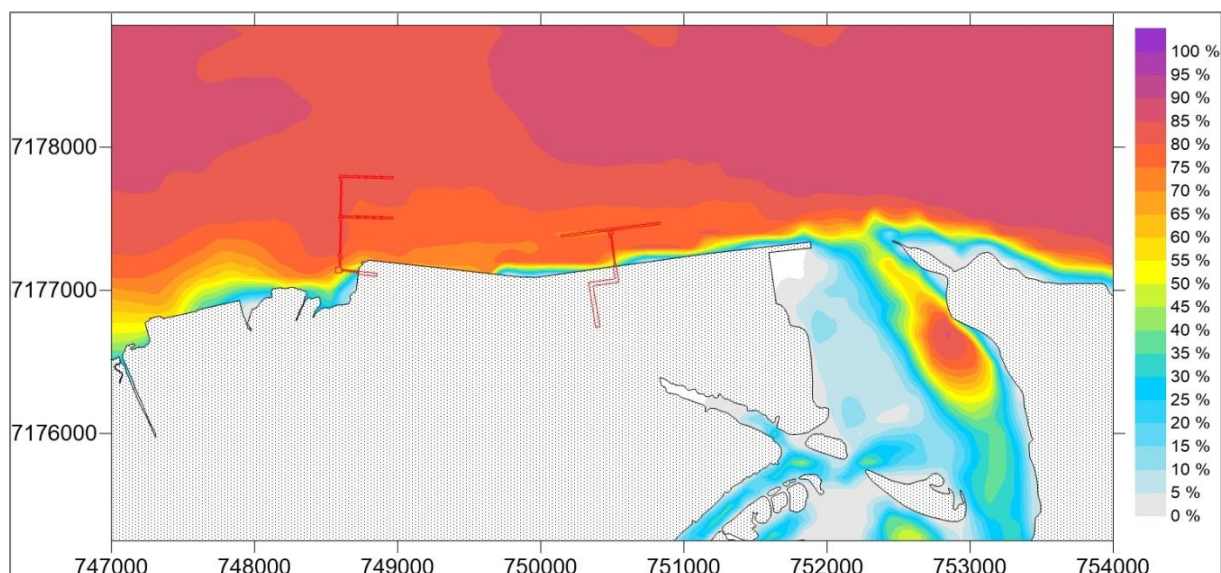




**Figura 109 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré enchente – quadratura – Cenário Prog-F – Inverno.**



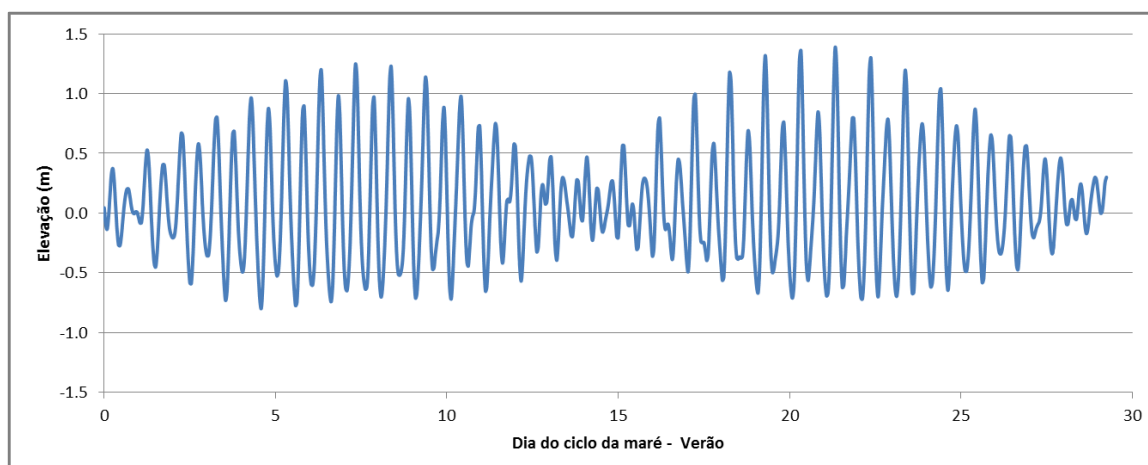
**Figura 110 – Probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente menores do que 0,01 m/s no Complexo Estuarino Paranaguá – Cenário Prog-F – Inverno.**





**Figura 111 – Probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente maiores do que 0,1 m/s no Complexo Estuarino Paranaguá – Cenário Prog-F – Inverno.**

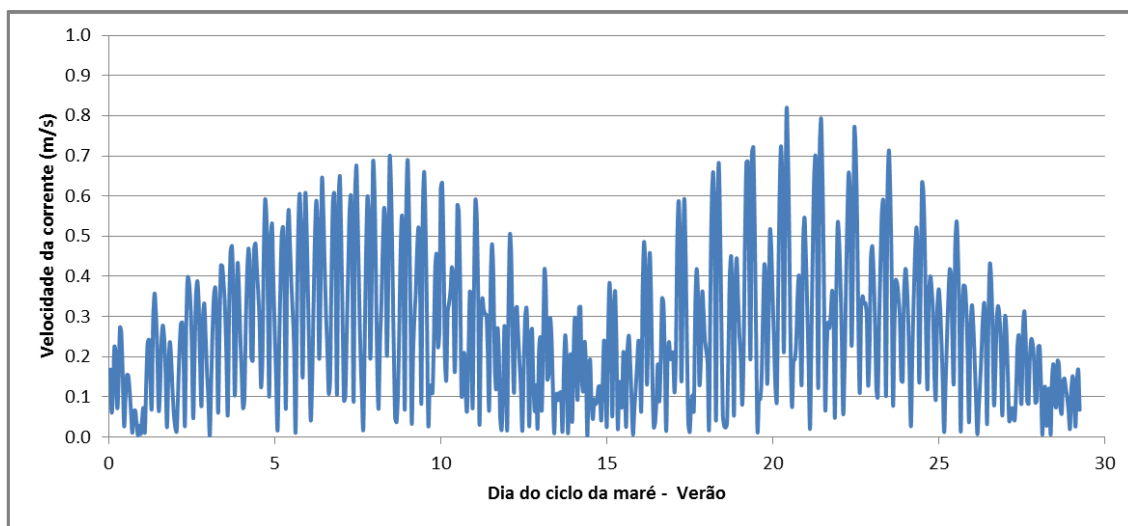
#### 1.4.7 Resultados de hidrodinâmica para o Cenário Prog-CN-Verão

Nos cenários Prog-CN as alterações hidrodinâmicas, em relação aos cenários de diagnóstico (Diag), ocorrem devido à inclusão dos píeres T e F, e também do Complexo Náutico e de suas respectivas áreas de dragagem. As evoluções temporais de elevação, velocidade e tensão no fundo são apresentadas, respectivamente, na Figura 112, na Figura 113 e na Figura 114. Os valores de elevação variam entre cerca de -0,8 m e 1,4 m. Já as velocidades máximas são da ordem de 0,8 m/s e o módulo de tensão no fundo máximo é da ordem de 1,2 N/m<sup>2</sup>. A elevação, nesse cenário, atingiu o maior valor dentre os analisados até agora e se assemelha ao Diag – Verão em termos de amplitude. Os valores de velocidade e de tensão também são maiores e próximos dos obtidos para o Cenário Diag – Verão.

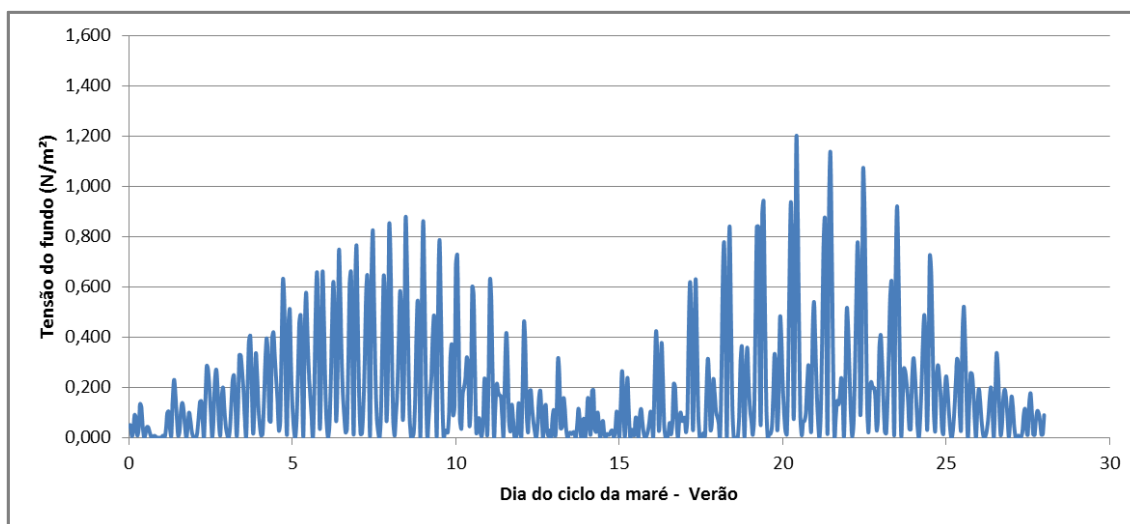


		Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:  118
		Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	

**Figura 112 – Série temporal de elevação – Cenário Prog-CN – Verão.**





**Figura 113 – Série temporal de velocidade de corrente – Cenário Prog-CN – Verão.**



**Figura 114 – Série temporal de tensão no fundo – Cenário Prog-CN – Verão.**

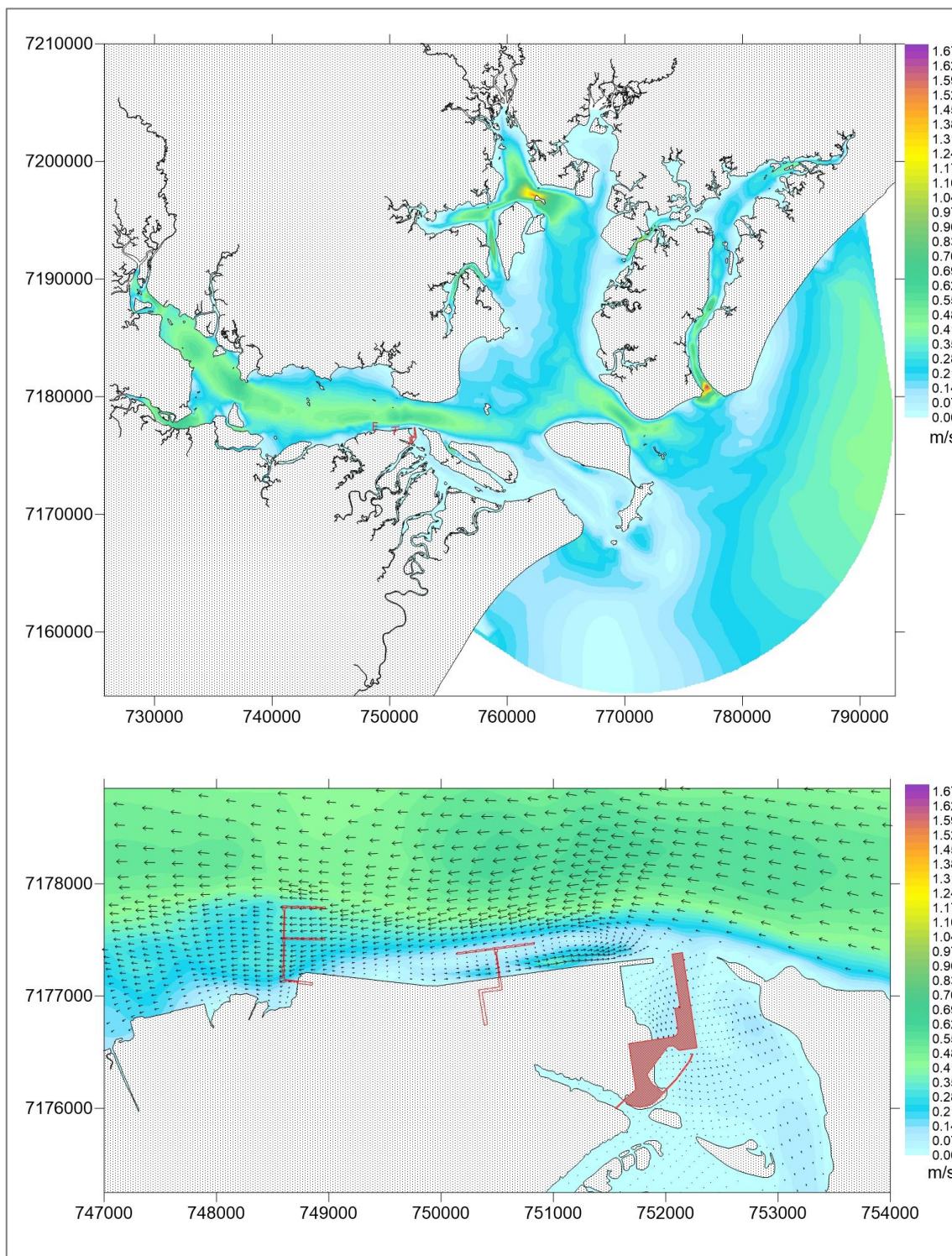
Com base na série de elevação da Figura 112, na Tabela 13 são apresentados os períodos selecionados para análise dos resultados espaciais. As distribuições espaciais das velocidades de corrente são apresentadas da Figura 115 até a Figura 122. Observa-se que, em sizígia, para as situações de meia-maré vazante, as máximas velocidades de corrente na área de interesse estão em cerca de 1,0 m/s; em preamar as velocidades atingem 0,7 m/s, e em meia-maré enchente e baixamar, as velocidades máximas são da ordem de 0,5 m/s. Em quadratura, com exceção da meia-maré enchente, cujos valores atingem 0,45 m/s, predominam velocidades da ordem de 0,3 m/s,.



		Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:  119
		Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	

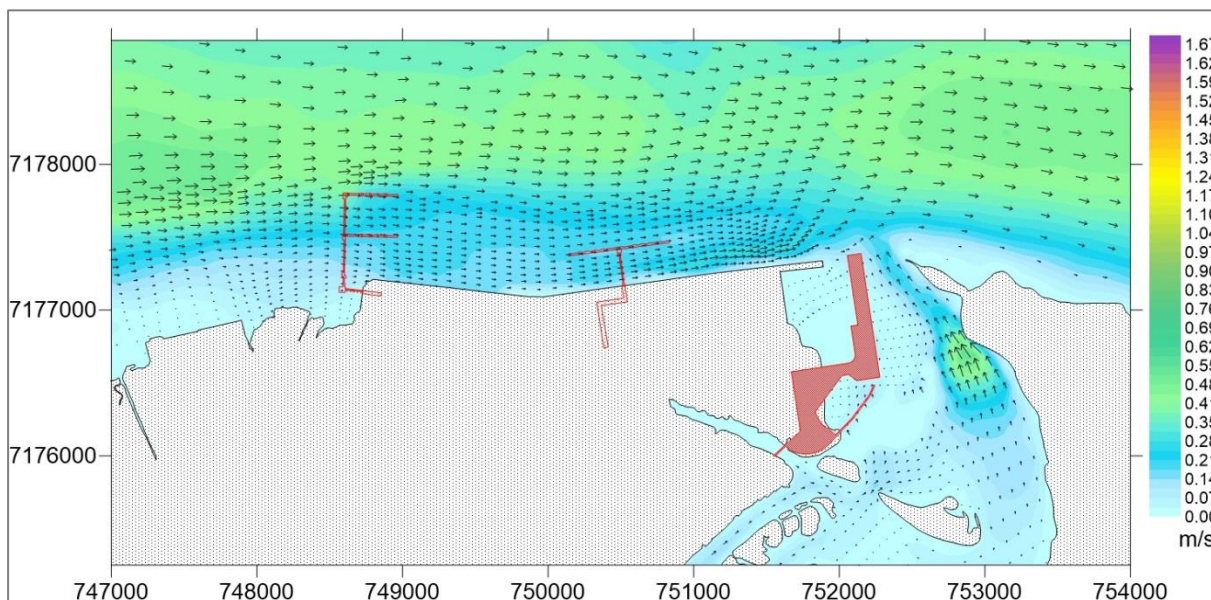
**Tabela 13 – Elevação, módulo da velocidade de corrente e tensão no fundo no ponto de referência para os períodos selecionados para análise das distribuições espaciais – Cenário Prog-CN – Verão.**

Situação		Dia do ciclo de maré e hora	Elevação (m)	Velocidade de corrente (m/s)	Tensão no fundo (N/m <sup>2</sup> )
Sizígia	Meia-maré Enchente	Dia 22 - 10:00	0,0792	0,2712	0,1328
	Meia-maré Vazante	Dia 22 - 4:00	0,1081	0,7938	1,1374
	Preamar	Dia 22 - 1:00	1,3877	0,4785	0,4068
	Baixamar	Dia 22 - 6:00	-0,6215	0,4116	0,3089
Quadratura	Meia-maré Enchente	Dia 15 - 1:00	0,0686	0,2368	0,1013
	Meia-maré Vazante	Dia 14 - 15:00	-0,0351	0,2042	0,0754
	Preamar	Dia 14 - 12:00	0,2772	0,1923	0,0666
	Baixamar	Dia 14 - 23:00	-0,2283	0,1415	0,0363

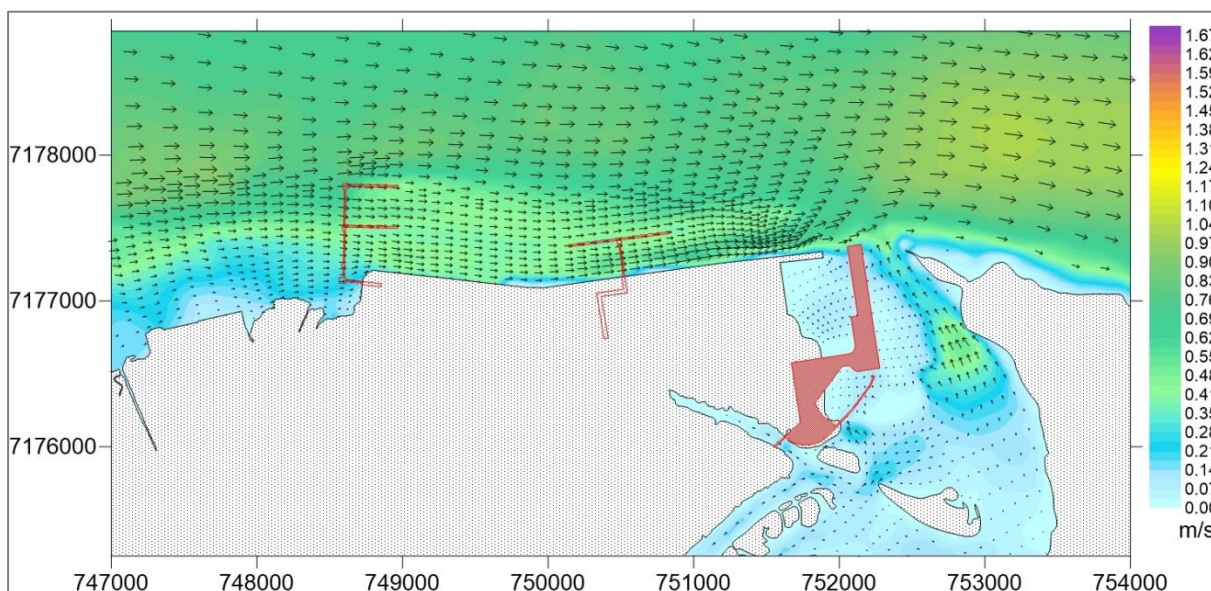


**Figura 115 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de preamar – sizígia – Cenário Prog-CN – Verão. Acima, resultados para toda a baía; abaixo, zoom na área de interesse.**



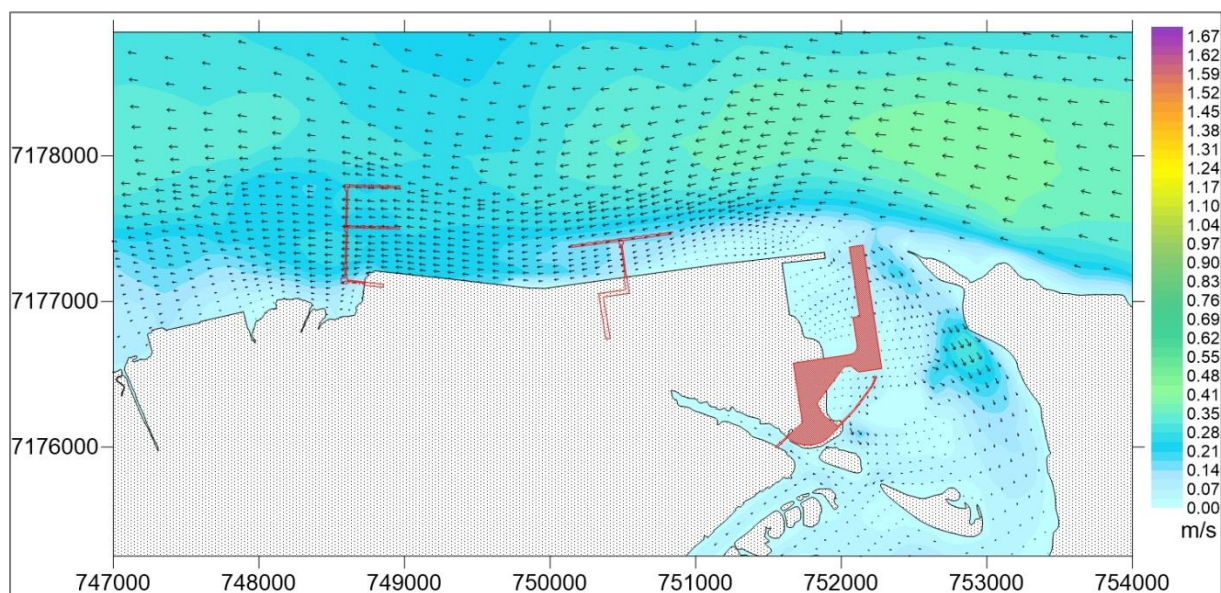


**Figura 116 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de baixamar – sizígia – Cenário Prog-CN – Verão.**

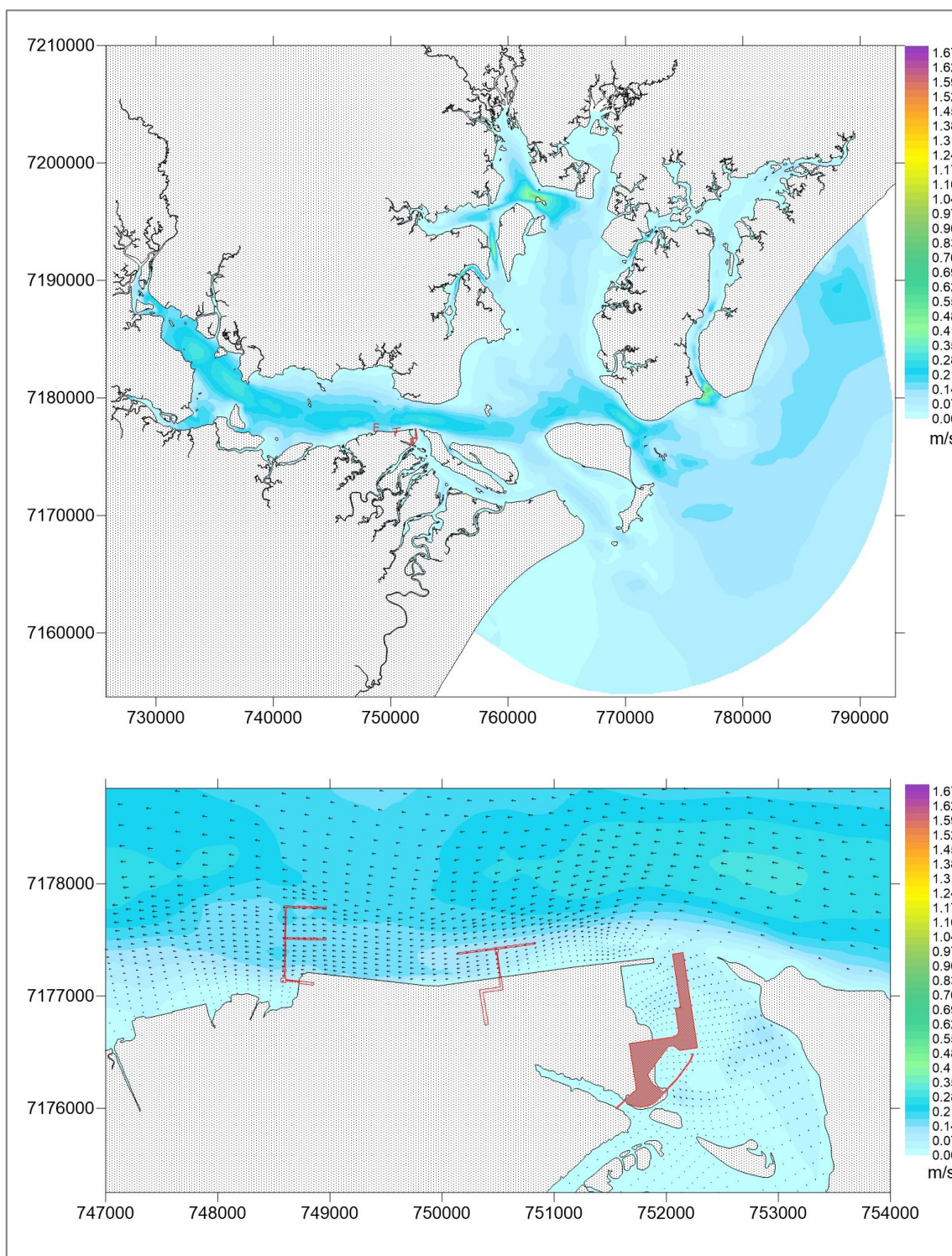


**Figura 117 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré vazante – sizígia – Cenário Prog-CN – Verão.**



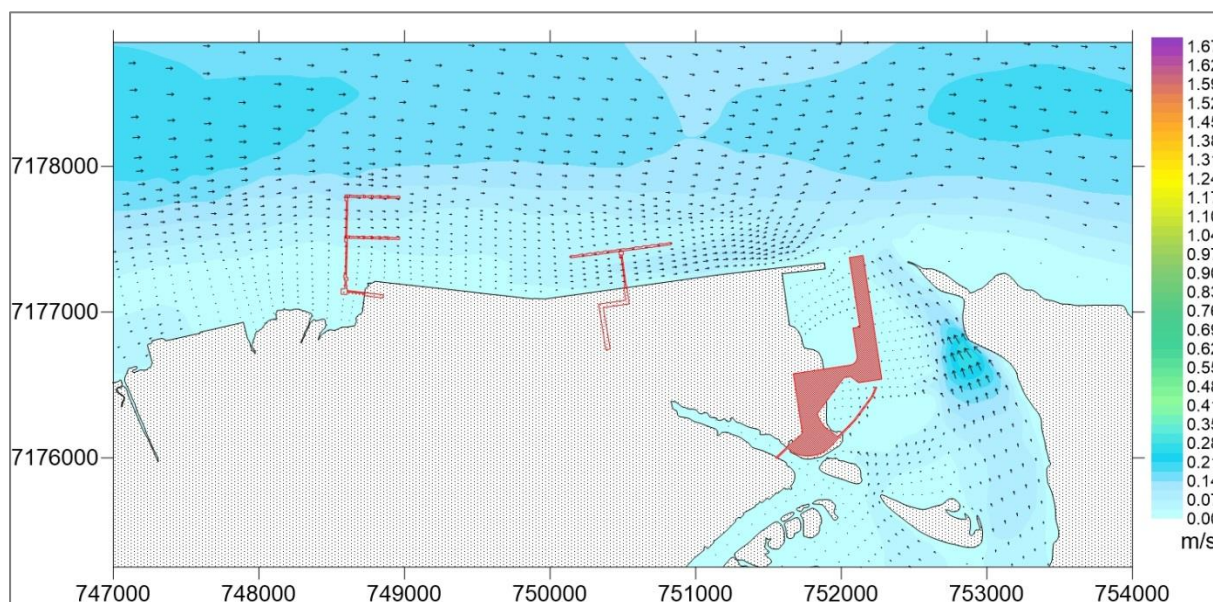


**Figura 118 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré enchente – sizígia – Cenário Prog-CN – Verão.**

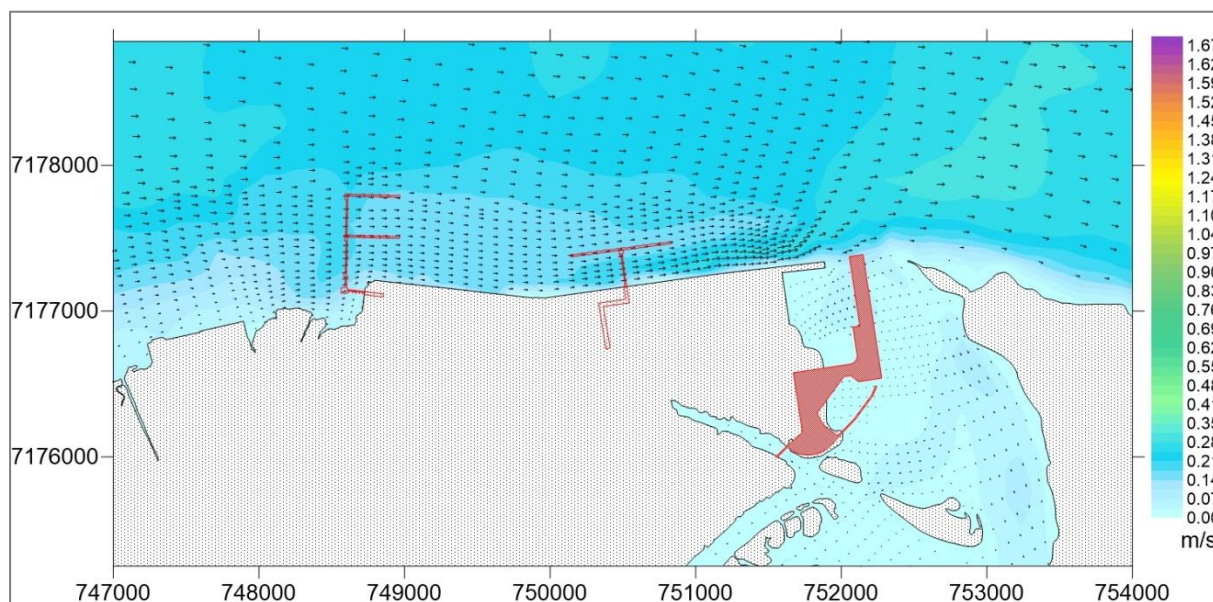


**Figura 119 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de preamar – quadratura – Cenário Prog-CN – Verão. Acima, resultados para toda a baía; abaixo, zoom na área de interesse.**



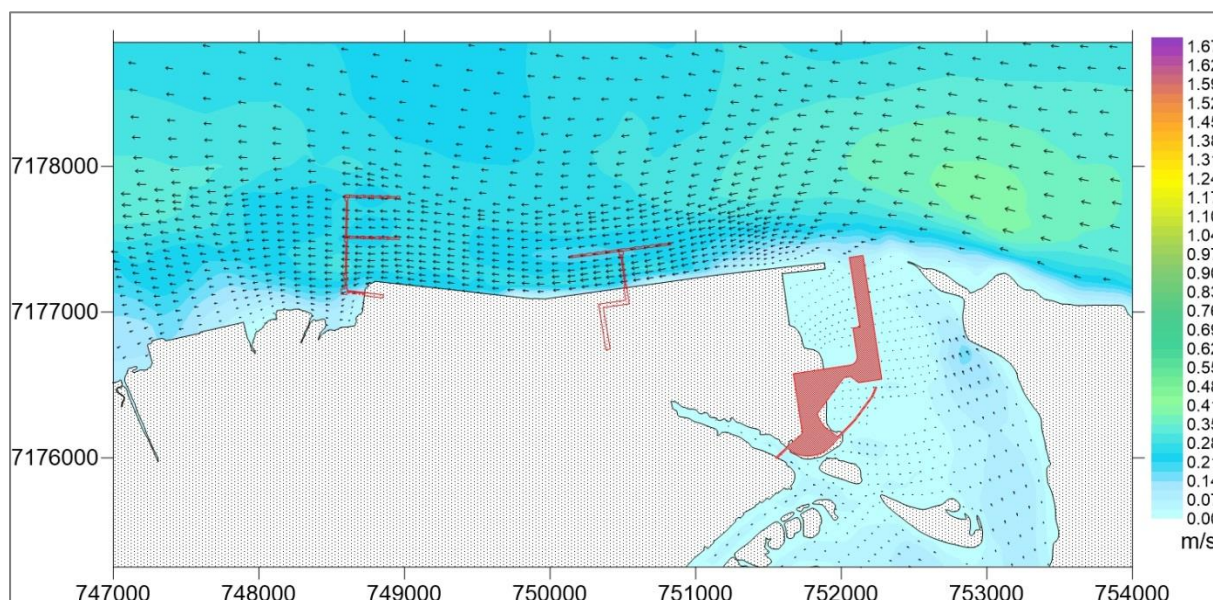


**Figura 120 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de baixamar – quadratura – Cenário Prog-CN – Verão.**



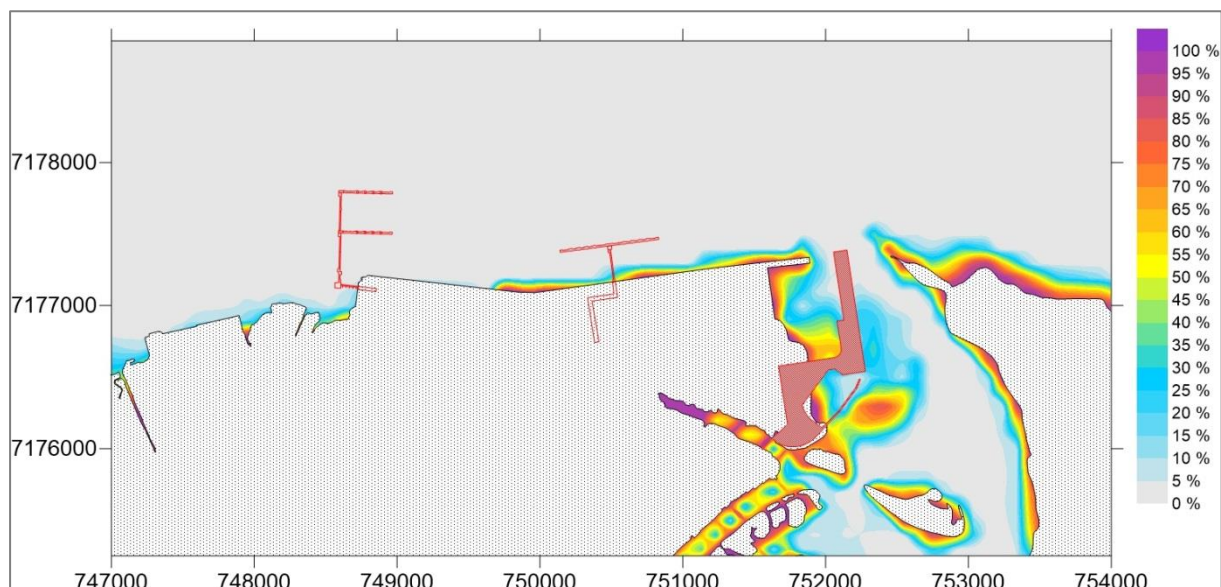
**Figura 121 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré vazante – quadratura – Cenário Prog-CN – Verão.**



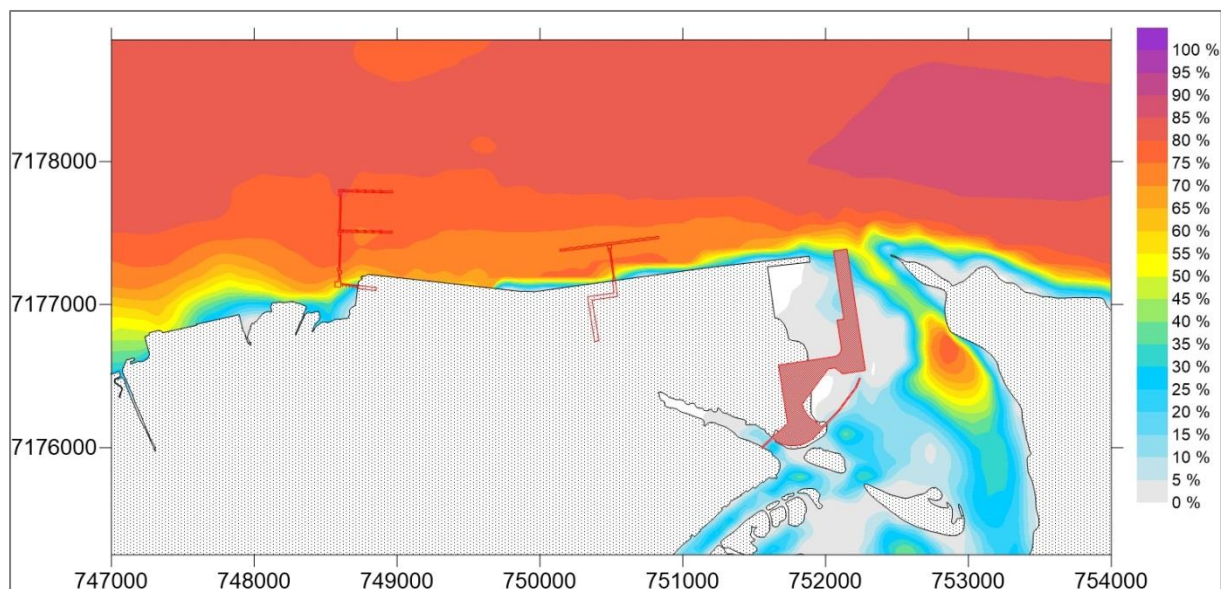


**Figura 122 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré enchente – quadratura – Cenário Prog-CN – Verão.**

Para o cenário Verão, a Figura 123 e a Figura 124 apresentam, respectivamente, as probabilidades de ocorrência de velocidades menores do que 0,01 m/s e maiores do que 0,1 m/s durante um ciclo de maré característico de verão. Quando comparadas aos cenários anteriores, as probabilidades de ocorrências de velocidades menores do que 0,01 m/s apresentam relativa redução na área de construção do Complexo Náutico, o que indica que o aumento da profundidade na região onde há alteração de batimetria fará com que as velocidades de corrente sejam maiores.



**Figura 123 – Probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente menores do que 0,01 m/s no Complexo Estuarino Paranaguá – Cenário Prog-CN – Verão.**

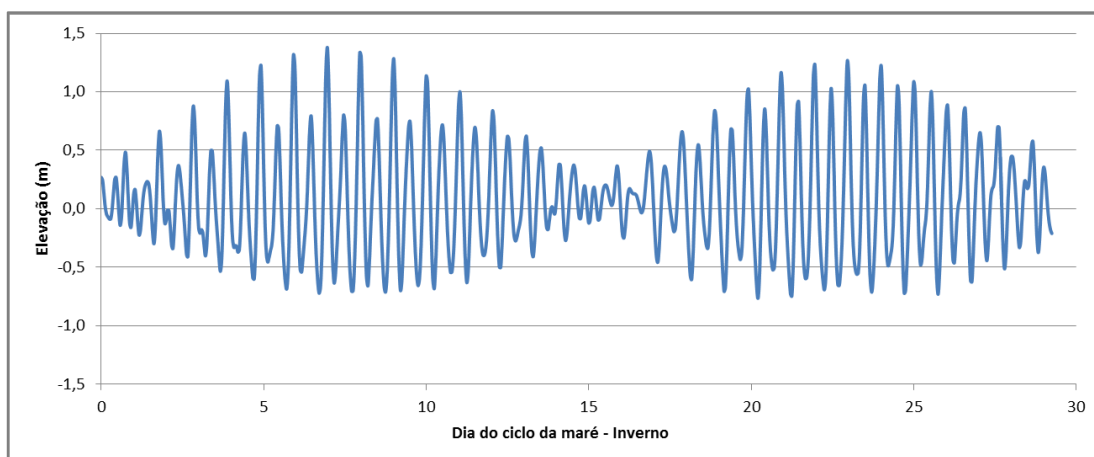


**Figura 124 – Probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente maiores do que 0,1 m/s no Complexo Estuarino Paranaguá – Cenário Prog-CN – Verão.**

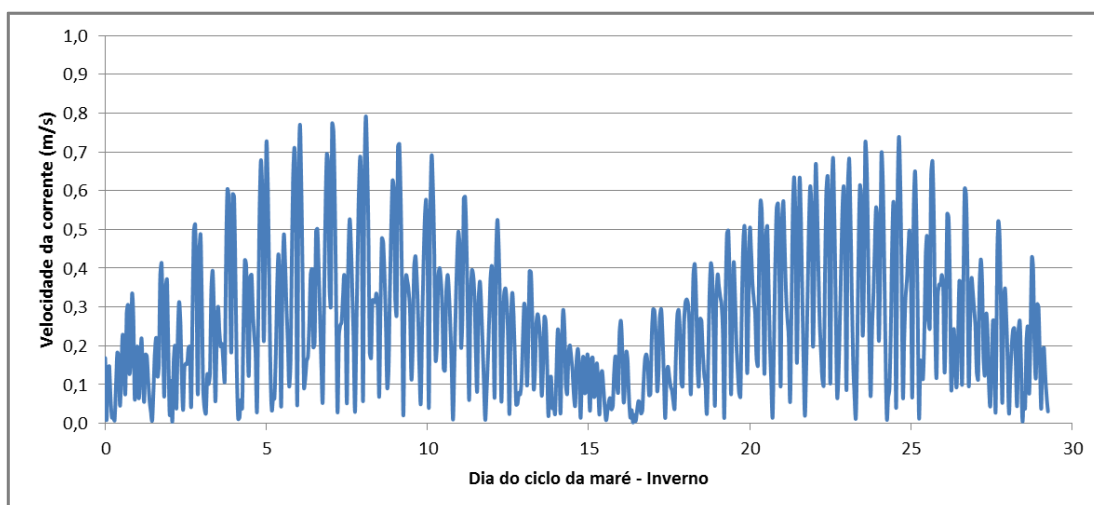
#### 1.4.8 Resultados de hidrodinâmica para o Cenário Prog-CN-Inverno

Para o cenário Prog-CN – Inverno, as séries temporais de elevação da superfície livre, velocidade de corrente e tensão no fundo são apresentadas respectivamente na Figura 125, na Figura 126 e na Figura 127. Para o ponto considerado, os valores observados são semelhantes aos do cenário anterior – a elevação varia entre -0,7 m e 1,4 m, enquanto as velocidades de corrente máximas são da ordem de 0,7 m/s; o módulo de tensão no fundo máximo é da ordem de 1,1 N/m<sup>2</sup>. É importante lembrar que esses valores se referem ao ponto de referência destacado na Figura 32, por isso os resultados são bastante similares ao Cenário Diag Verão.

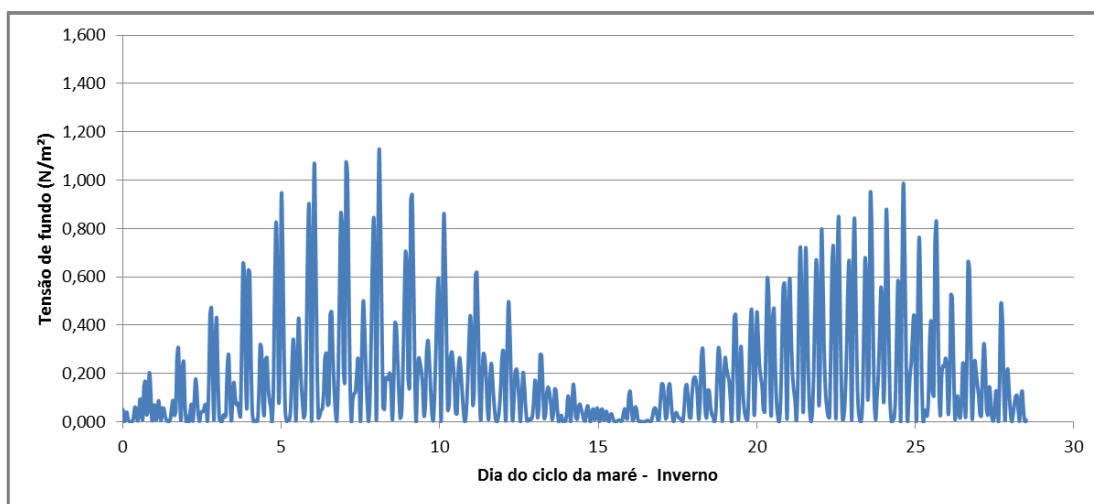
Com base na série temporal de elevação da superfície livre, apresentada acima, a Tabela 14 apresenta os momentos definidos para análise das distribuições espaciais das velocidades de corrente. Nessa tabela, para o ponto de referência, também são apresentadas as amplitudes de elevação, módulo da velocidade de corrente e tensão no fundo. Da Figura 128 até a Figura 135 são apresentadas as distribuições espaciais das velocidades de corrente para o Cenário Prog-CN – Inverno. Observa-se, na região de interesse, que nas situações de meia-maré vazante, meia-maré enchente e preamar em sizígia, as velocidades de corrente máximas são da ordem de 0,8 m/s enquanto para baixamar não ultrapassam 0,3 m/s. Em quadratura, predominam velocidades menores do que 0,4 m/s.



**Figura 125 – Série temporal de elevação – Cenário Prog-CN – Inverno.**





**Figura 126 – Série temporal de velocidade de corrente – Cenário Prog-CN – Inverno.**



**Figura 127 – Série temporal de tensão no fundo – Cenário Prog-CN – Inverno.**

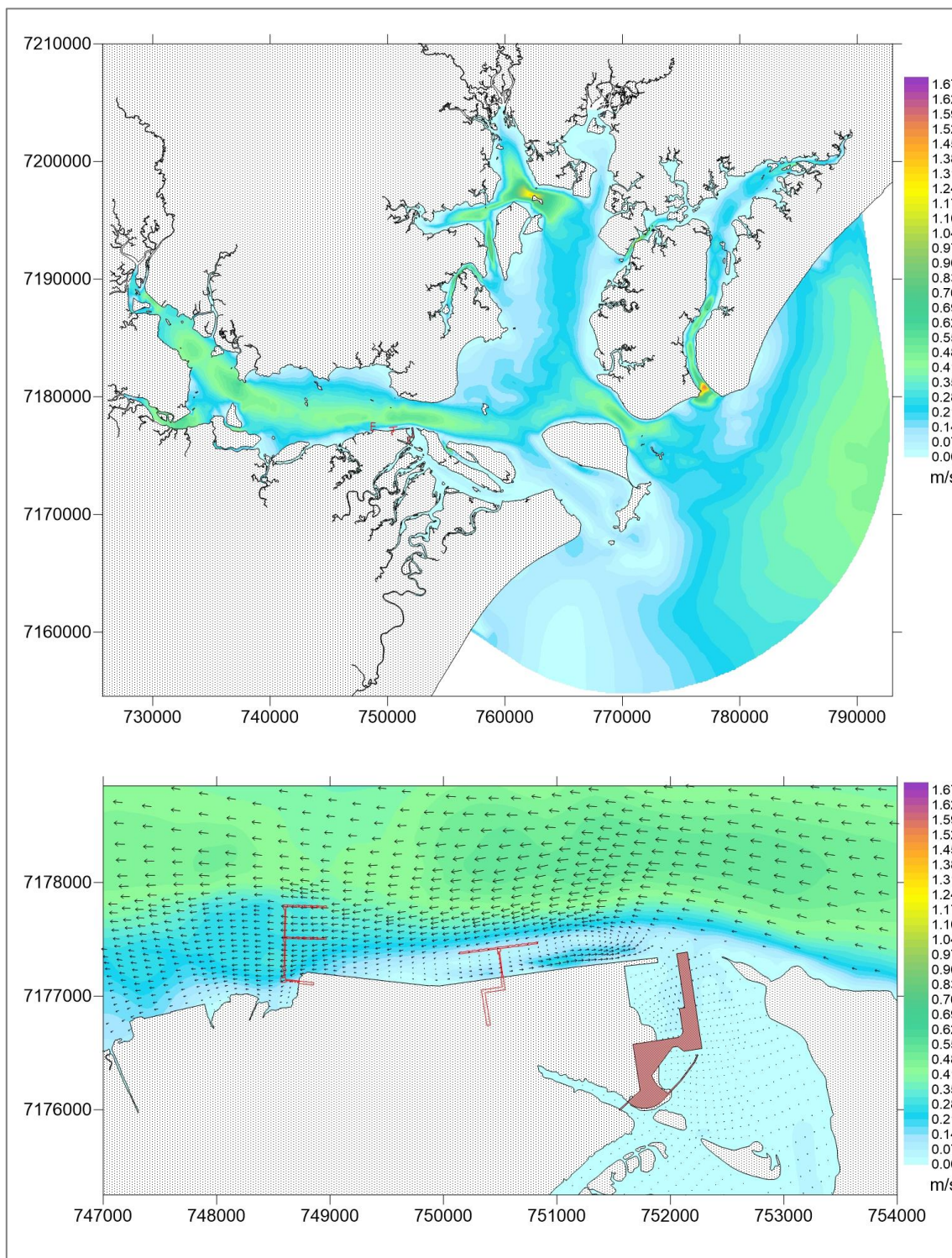


		Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
		Nº PLANAVE	REV. PLANAVE	128
		RL-B00-H01-1001	0	

**Tabela 14 – Elevação, módulo da velocidade de corrente e tensão no fundo no ponto de referência para os períodos selecionados para análise das distribuições espaciais – Cenário Prog-CN – Inverno.**

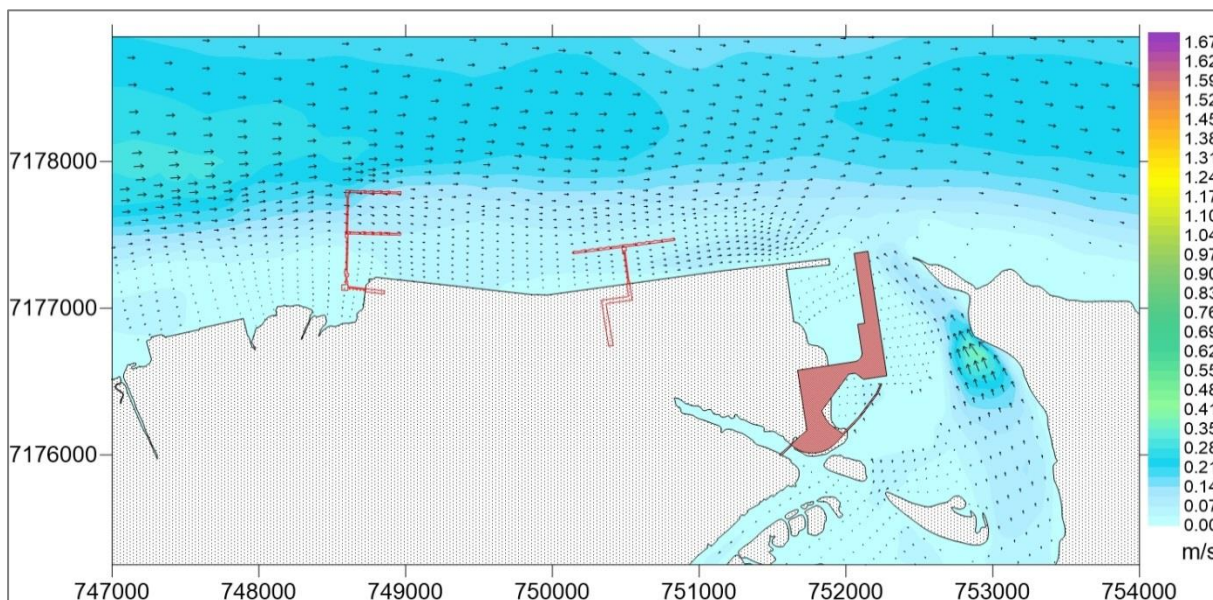
Situação		Dia do ciclo de maré e hora	Elevação (m)	Velocidade de corrente (m/s)	Tensão no fundo (N/m <sup>2</sup> )
Sizígia	Meia-maré Enchente	Dia 23 - 10:00	0,0439	0,4025	0,2926
	Meia-maré Vazante	Dia 23 - 16:00	0,1766	0,6831	0,8416
	Preamar	Dia 23 - 13:00	1,2659	0,4332	0,3339
	Baixamar	Dia 24 - 7:00	-0,7132	0,2141	0,0837
Quadratura	Meia-maré Enchente	Dia 15 - 16:00	0,0224	0,1641	0,0487
	Meia-maré Vazante	Dia 15 - 20:00	-0,0075	0,1548	0,0433
	Preamar	Dia 15 - 18:00	0,1845	0,0686	0,0085
	Baixamar	Dia 15 - 14:00	-0,1222	0,1258	0,0287

As probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente menores do que 0,01 m/s são apresentadas na Figura 136; a Figura 137 apresenta as probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente maiores do que 0,1 m/s, ambas para um ciclo típico de maré de inverno. Na área de construção do Complexo Náutico, quando comparado com o cenário Diag – Inverno, houve redução das áreas de maior probabilidade de ocorrência de velocidades menores do que 0,01 m/s, ou seja, com o aumento da profundidade, as velocidades de corrente tendem a aumentar. Entretanto, comparando as probabilidades de velocidades superiores a 0,1 m/s entre os mesmos cenários não houve alteração significativa nessa região.

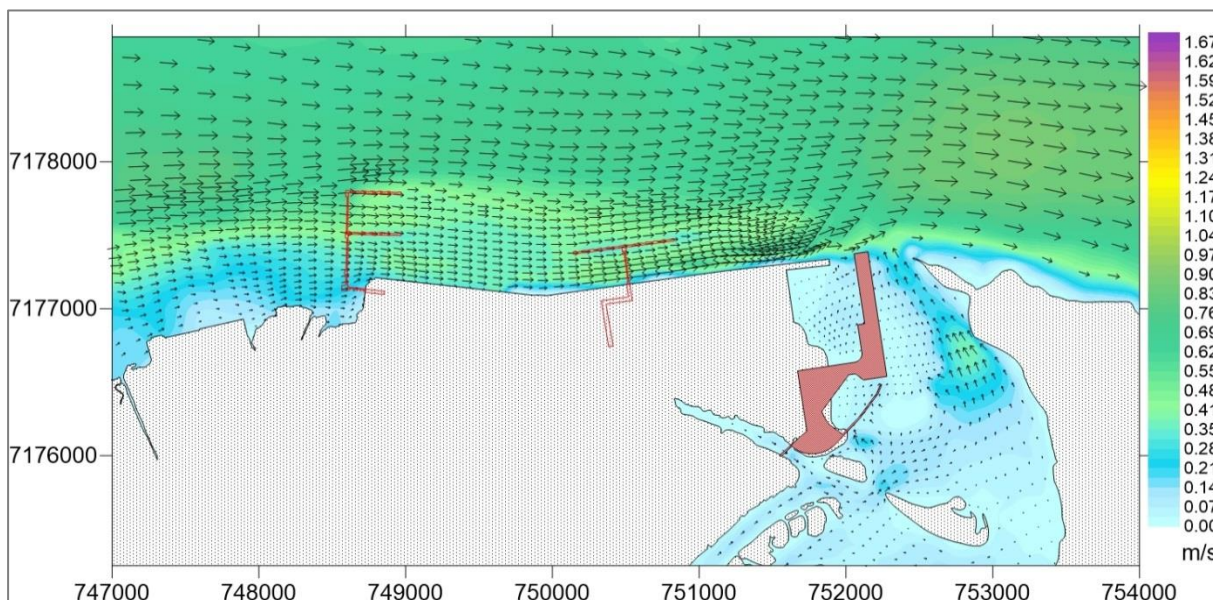


**Figura 128 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de preamar – sizígia – Cenário Prog-CN – Inverno. Acima, resultados para toda a baía; abaixo, zoom na área de interesse.**



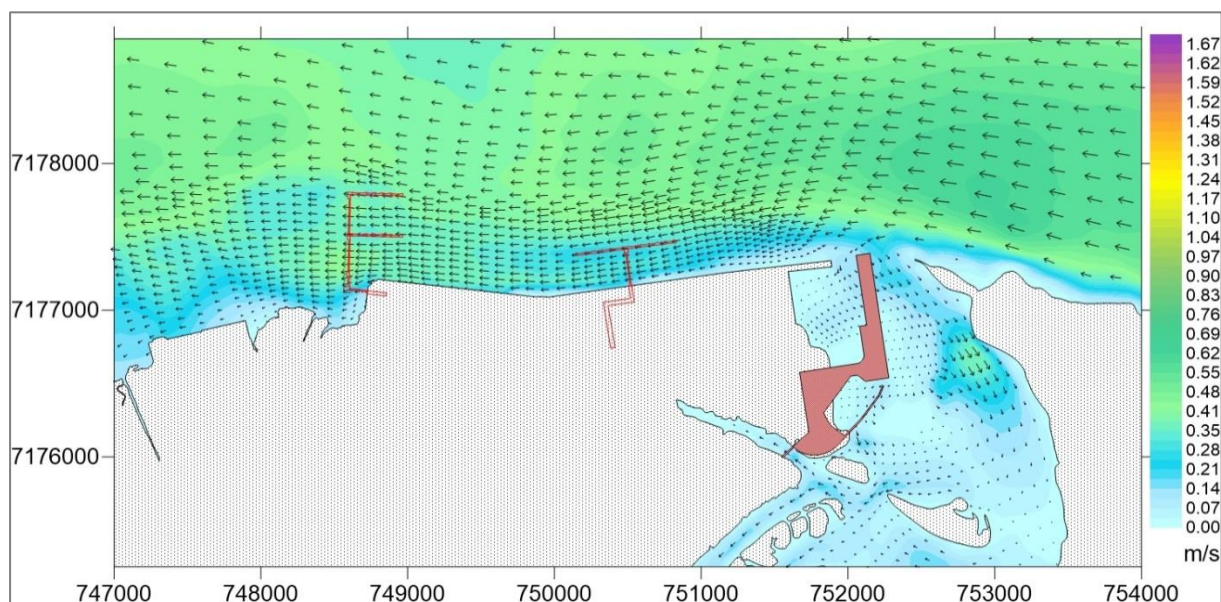


**Figura 129 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de baixamar – sizigia – Cenário Prog-CN – Inverno.**

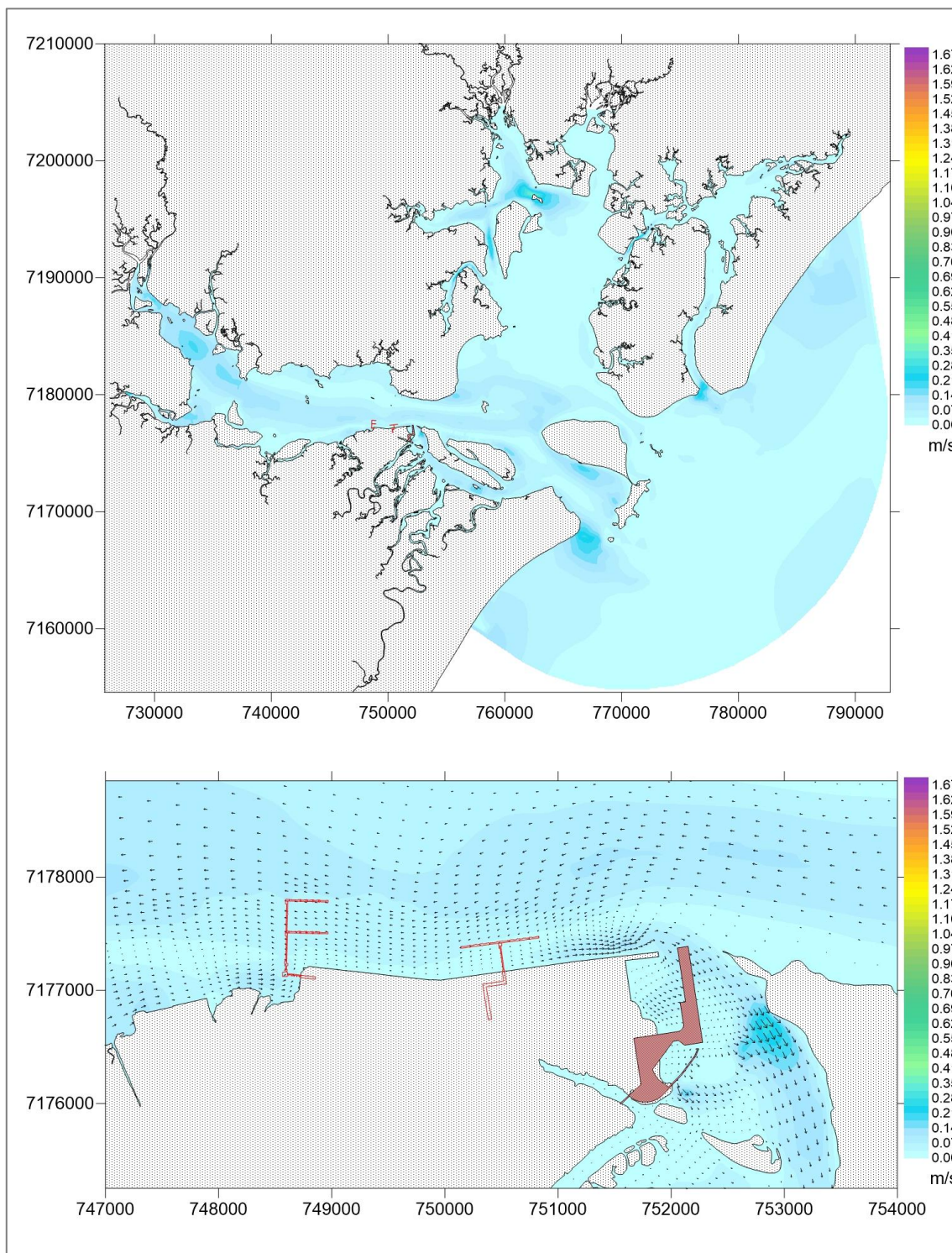


**Figura 130 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré vazante – sizigia – Cenário Prog-CN – Inverno.**



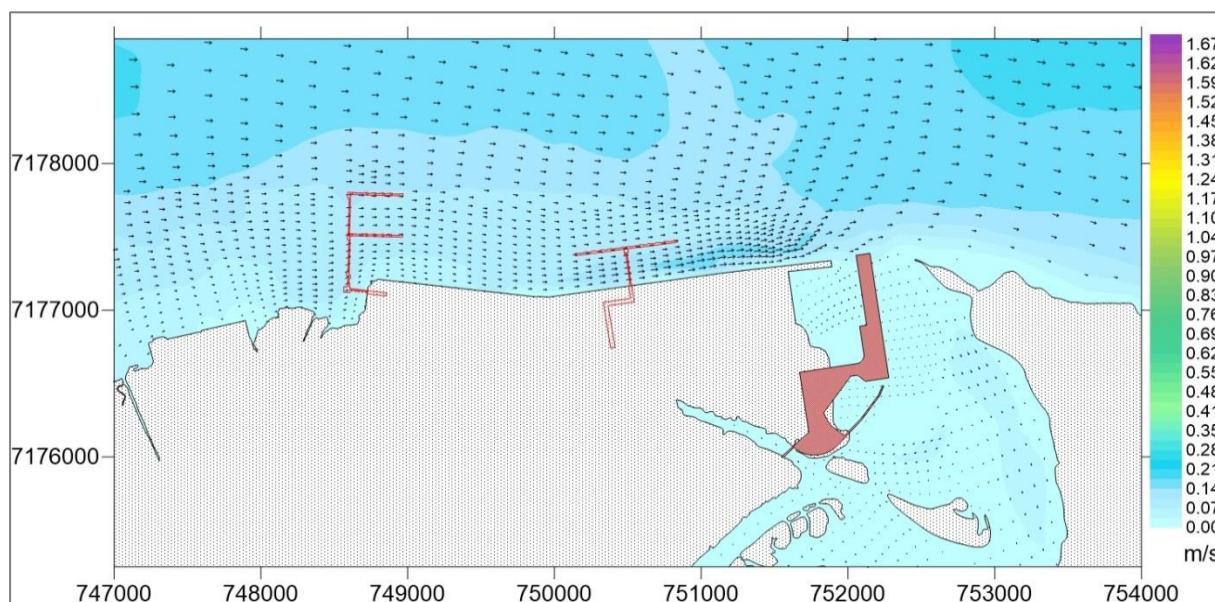


**Figura 131 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré enchente – sizigia – Cenário Prog-CN – Inverno.**

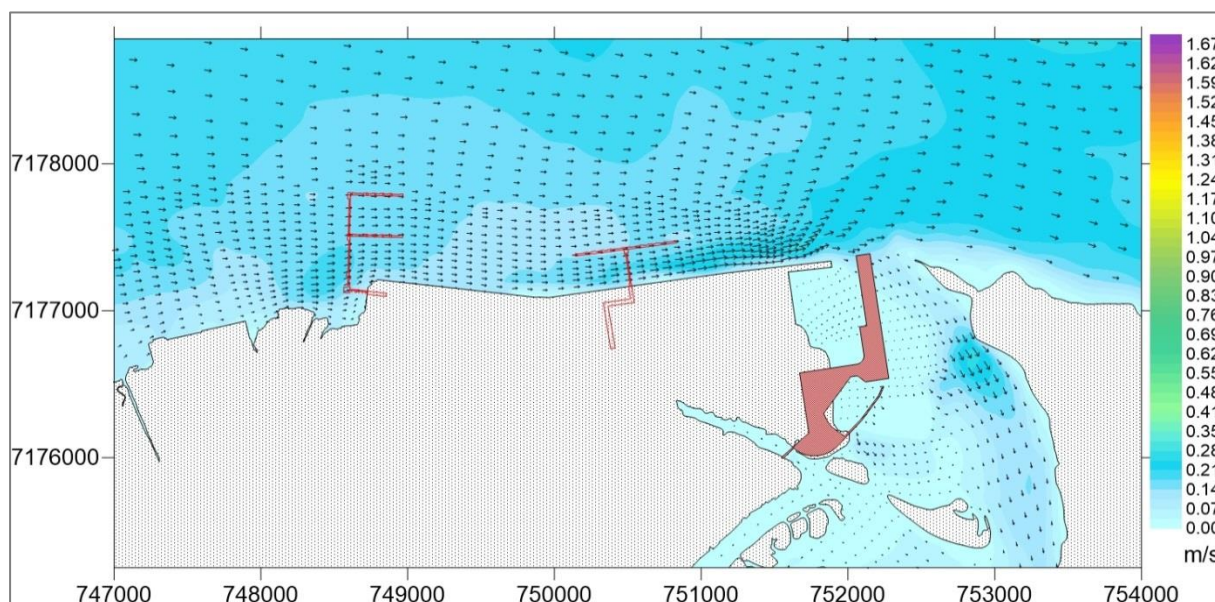


**Figura 132 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de preamar – quadratura – Cenário Prog-CN – Inverno. Acima, resultados para toda a baía; abaixo, zoom na área de interesse.**



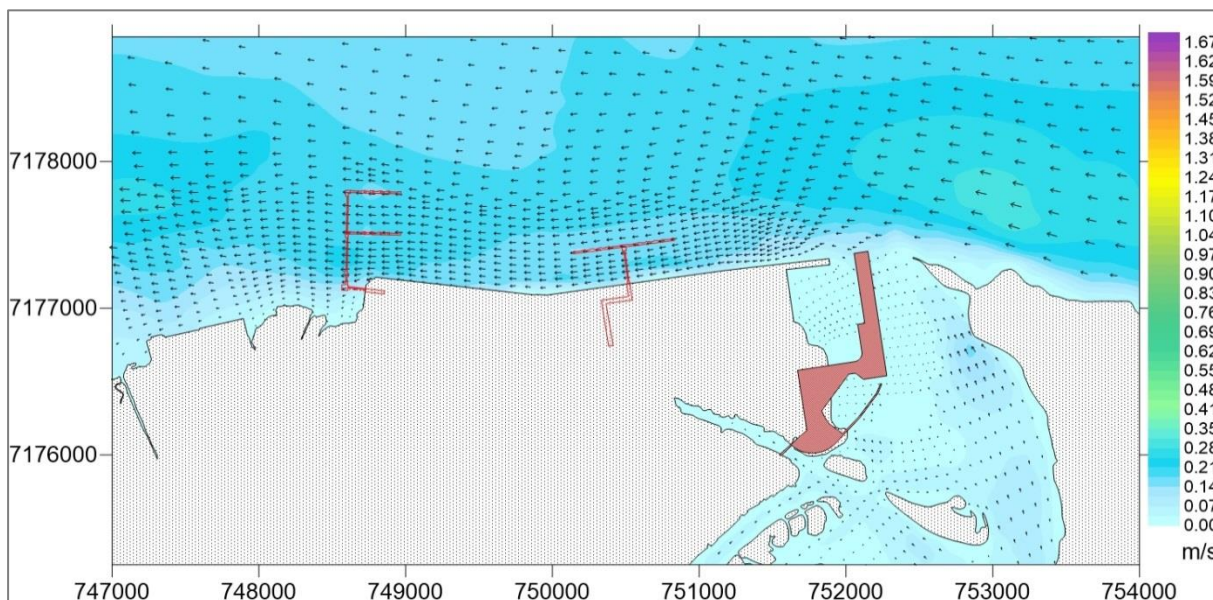


**Figura 133 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de baixamar – quadratura – Cenário Prog-CN – Inverno.**

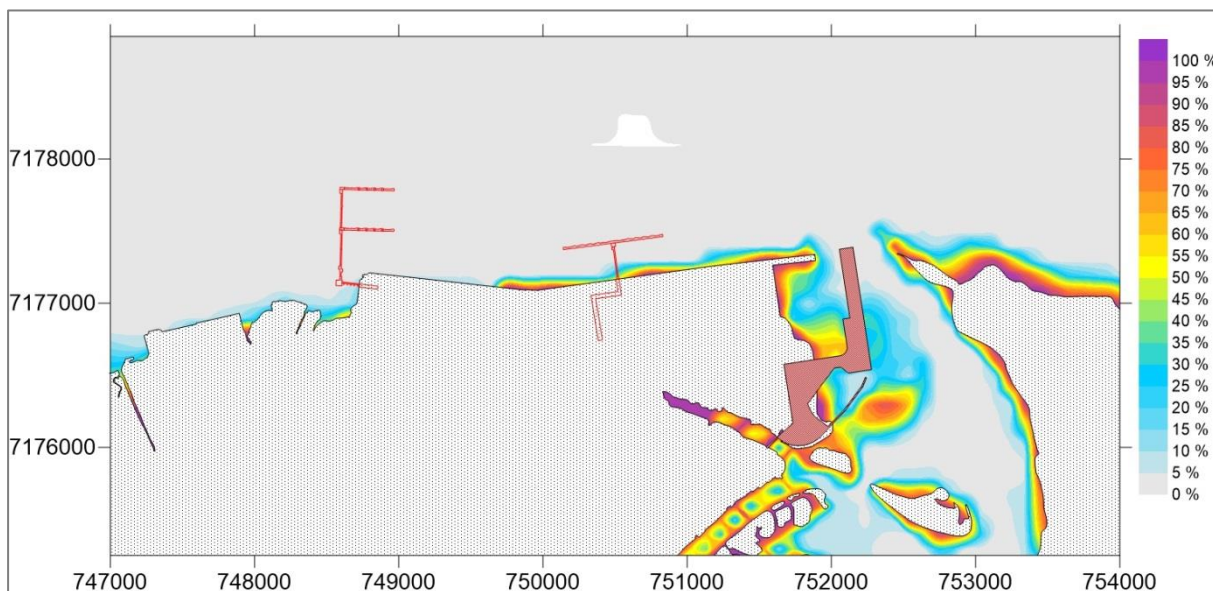


**Figura 134 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré vazante – quadratura – Cenário Prog-CN – Inverno.**

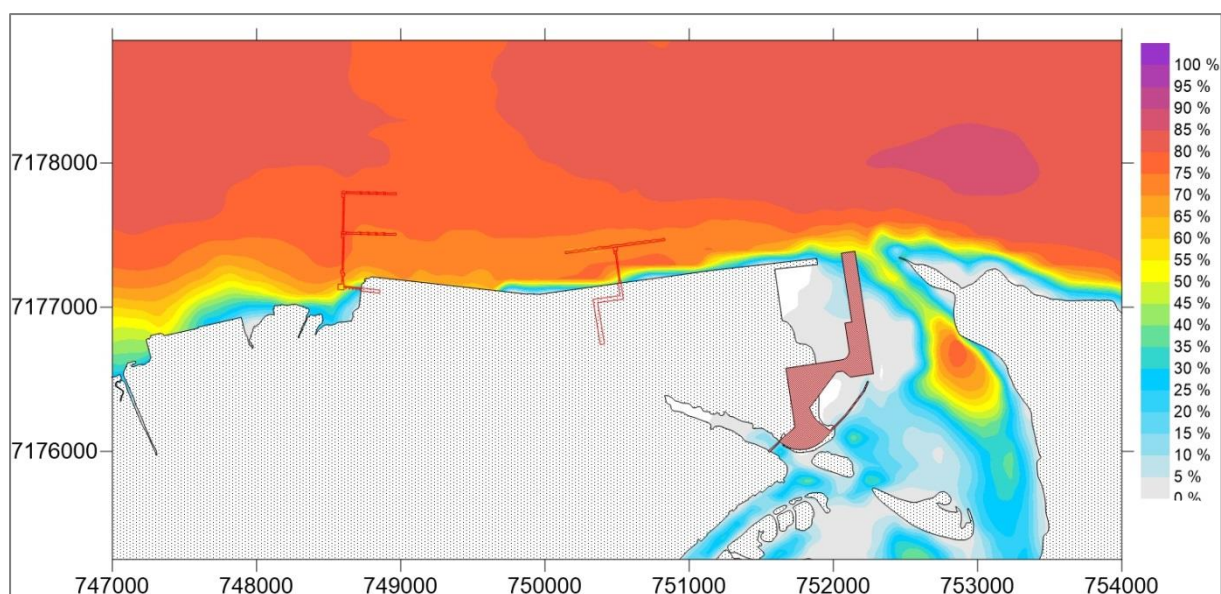




**Figura 135 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré enchente – quadratura – Cenário Prog-CN – Inverno.**



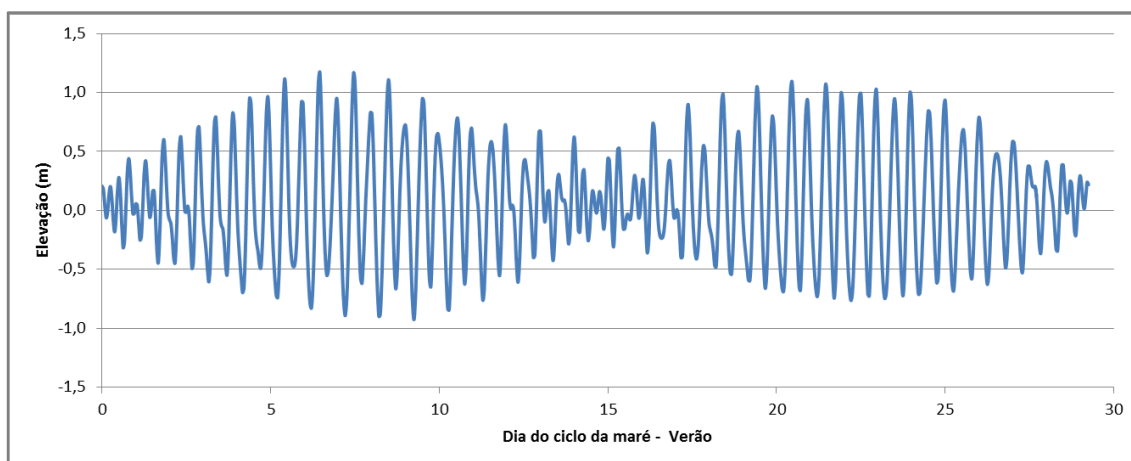
**Figura 136 – Probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente menores do que 0,01 m/s no Complexo Estuarino Paranaguá – Cenário Prog-CN – Inverno.**



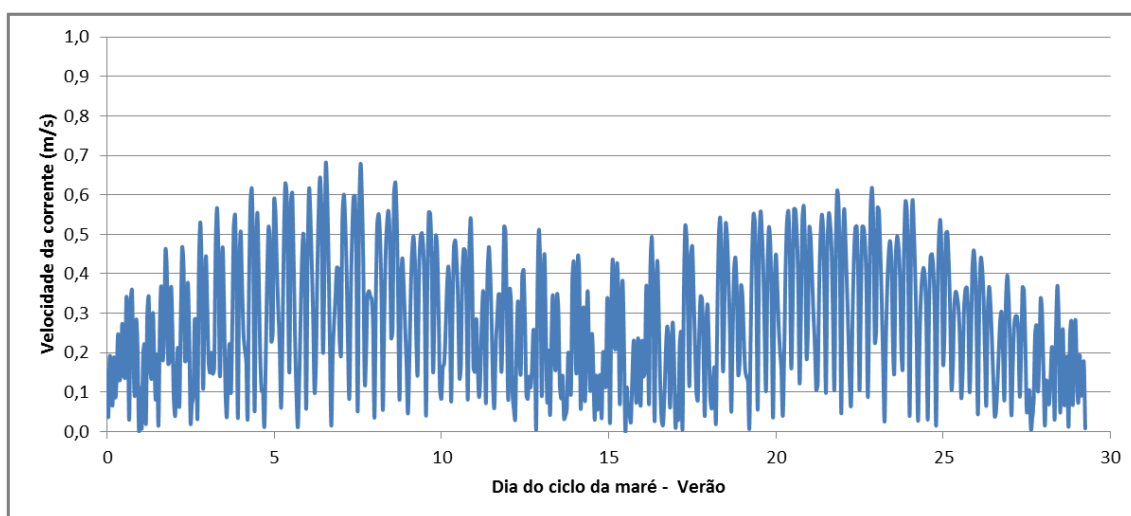
**Figura 137 – Probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente maiores do que 0,1 m/s no Complexo Estuarino Paranaguá – Cenário Prog-CN – Inverno.**

#### 1.4.9 Resultados de hidrodinâmica para Cenário Prog-L-Verão

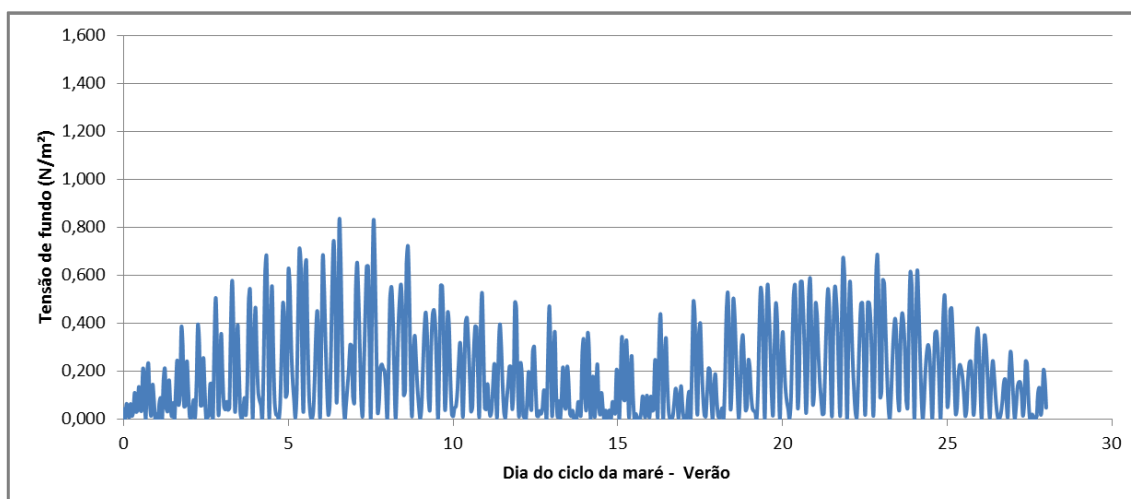
O Cenário Prog-L representa o acúmulo de todas as estruturas de ampliação previstas, ou seja, estão incluídos os píeres T e F, o Complexo Náutico e o píer L, além de suas respectivas mudanças de batimetria resultantes dos processos de dragagem. Nesse contexto, para o cenário de Verão, a Figura 138 apresenta a evolução temporal de elevação do nível da superfície livre, a Figura 139 mostra a evolução temporal da velocidade de corrente, e a Figura 140 apresenta a evolução temporal da tensão no fundo, todas para o ponto de referência já considerado anteriormente. Nesse ponto, observa-se que os valores de elevação variam entre cerca de -0,9 m e 1,1 m, as velocidades máximas são da ordem de 0,6 m/s, enquanto as tensões máximas no fundo não ultrapassam 0,8 N/m<sup>2</sup>.



**Figura 138 – Série temporal de elevação – Cenário Prog-L – Verão.**





**Figura 139 – Série temporal de velocidade de corrente – Cenário Prog-L – Verão.**



**Figura 140 – Série temporal de tensão no fundo – Cenário Prog-L – Verão.**



 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	137

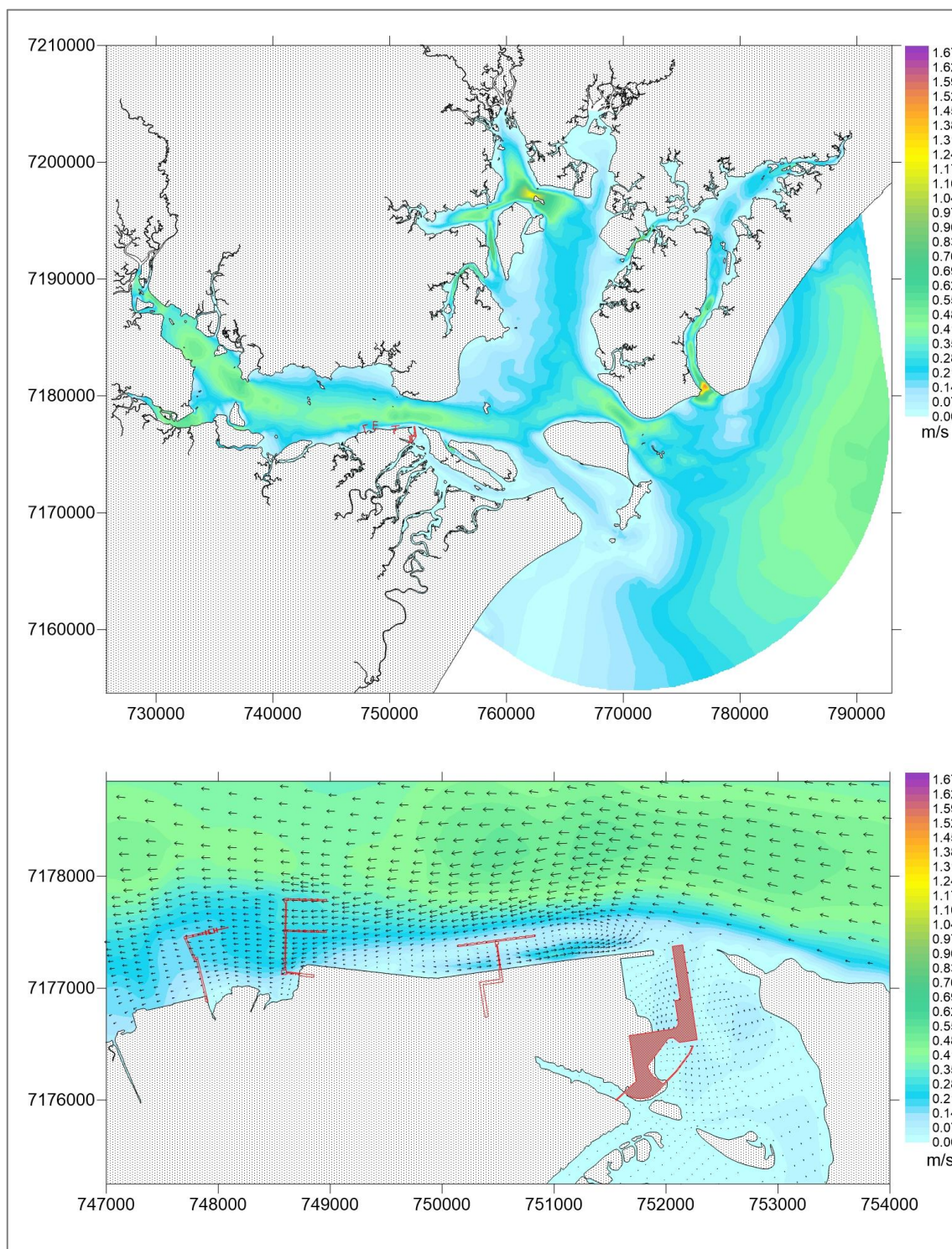
Os tempos definidos para análise das distribuições espaciais e respectivas elevações, velocidades de corrente e tensão no fundo são apresentados na Tabela 15 – esses valores foram obtidos com base no ponto de referência utilizado para análise das séries temporais apresentadas acima. As distribuições espaciais das velocidades de corrente – apresentadas da Figura 141 até a Figura 148 – mostram, para a área de interesse desse estudo, que em sizígia, nas situações de meia-maré enchente e meia-maré vazante, as velocidades de corrente máximas são da ordem de 0,9 m/s; para preamar, as máximas são de 0,7 m/s e em baixamar não ultrapassam 0,3 m/s. Em quadratura, predominam velocidades menores do que 0,3 m/s, sendo maiores na meia-maré enchente, quando atingem 0,6 m/s.

**Tabela 15 – Elevação, módulo da velocidade de corrente e tensão no fundo no ponto de referência para os períodos selecionados para análise das distribuições espaciais – Cenário Prog-L – Verão.**

Situação		Dia do ciclo de maré e hora	Elevação (m)	Velocidade de corrente (m/s)	Tensão no fundo (N/m <sup>2</sup> )
Sizígia	Meia-maré Enchente	Dia 8 - 1:00	-0,0364	0,4982	0,4489
	Meia-maré Vazante	Dia 7 - 19:00	-0,0985	0,6009	0,6536
	Preamar	Dia 8 - 4:00	1,1670	0,4236	0,3197
	Baixamar	Dia 7 - 22:00	-0,8923	0,2123	0,0824
Quadratura	Meia-maré Enchente	Dia 14 - 22:00	0,0561	0,2801	0,1418
	Meia-maré Vazante	Dia 14 - 11:00	0,0217	0,0578	0,0060
	Preamar	Dia 15 - 0:00	0,3451	0,0783	0,0110
	Baixamar	Dia 15 - 3:00	-0,2575	0,1971	0,0705

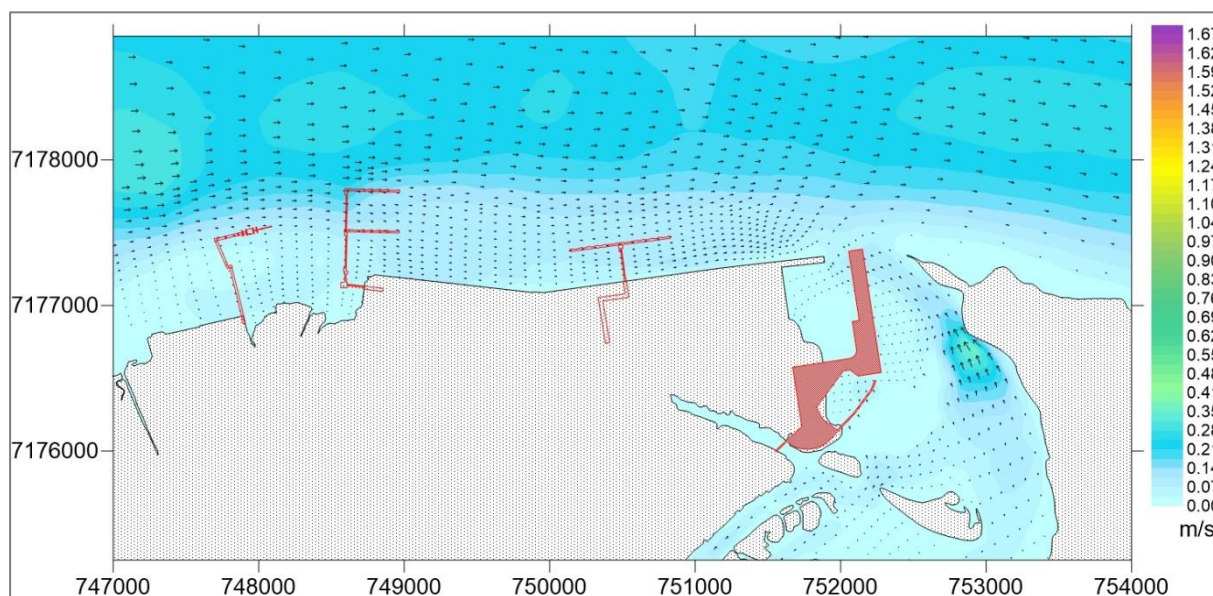
A Figura 149 e a Figura 150 apresentam, respectivamente, as probabilidades de ocorrência de velocidades menores do que 0,01 m/s e de velocidades maiores do que 0,1 m/s durante um ciclo de maré típico de verão. Comparando este cenário com os cenários de diagnóstico,

e Prog-T e Prog-F, percebe-se uma pequena redução de probabilidade de ocorrência de altas velocidades na área do píer L. Para ocorrência de baixas velocidades não foram observadas alterações significativas.

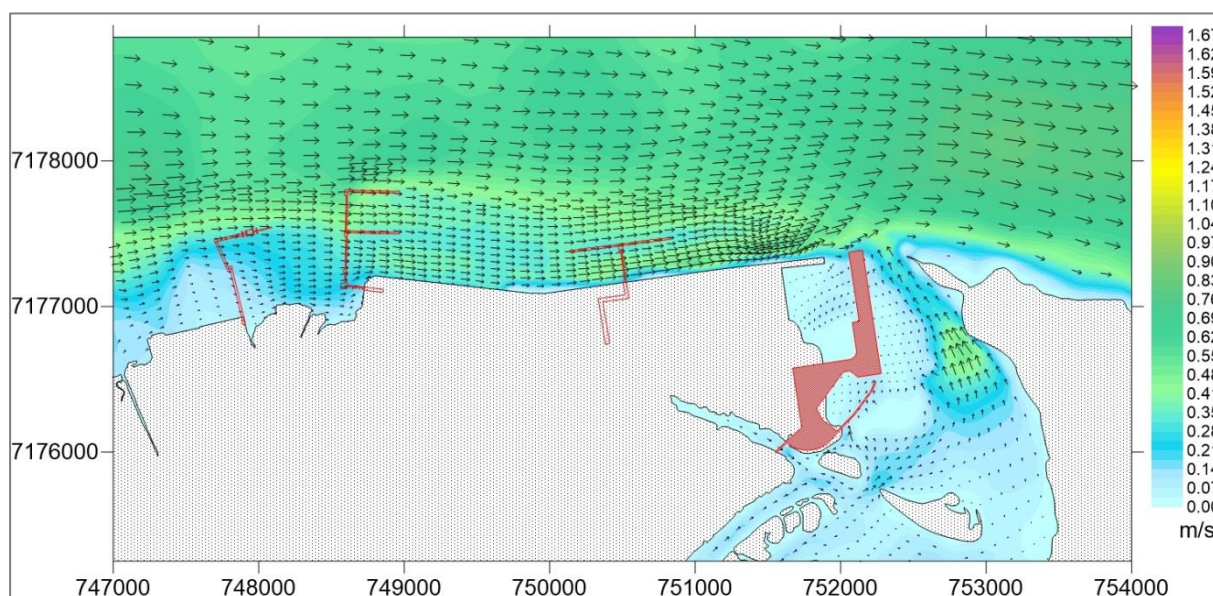


**Figura 141 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de preamar – sizígia – Cenário Prog-L – Verão. Acima, resultados para toda a baía; abaixo, zoom na área de interesse.**



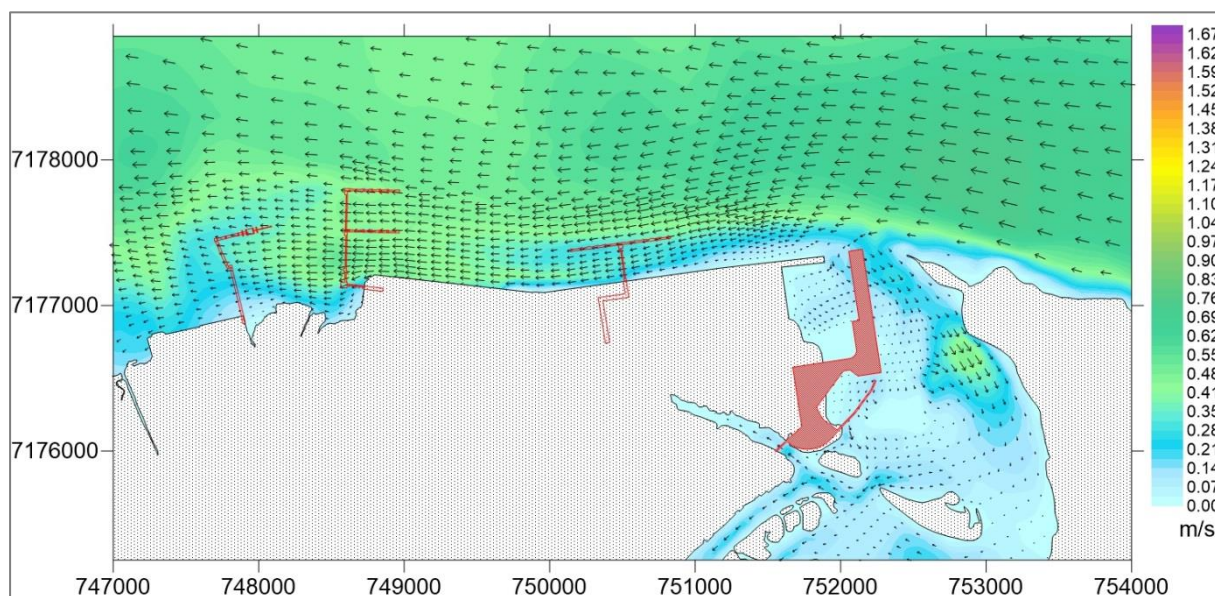


**Figura 142 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de baixamar – sizígia – Cenário Prog-L – Verão.**

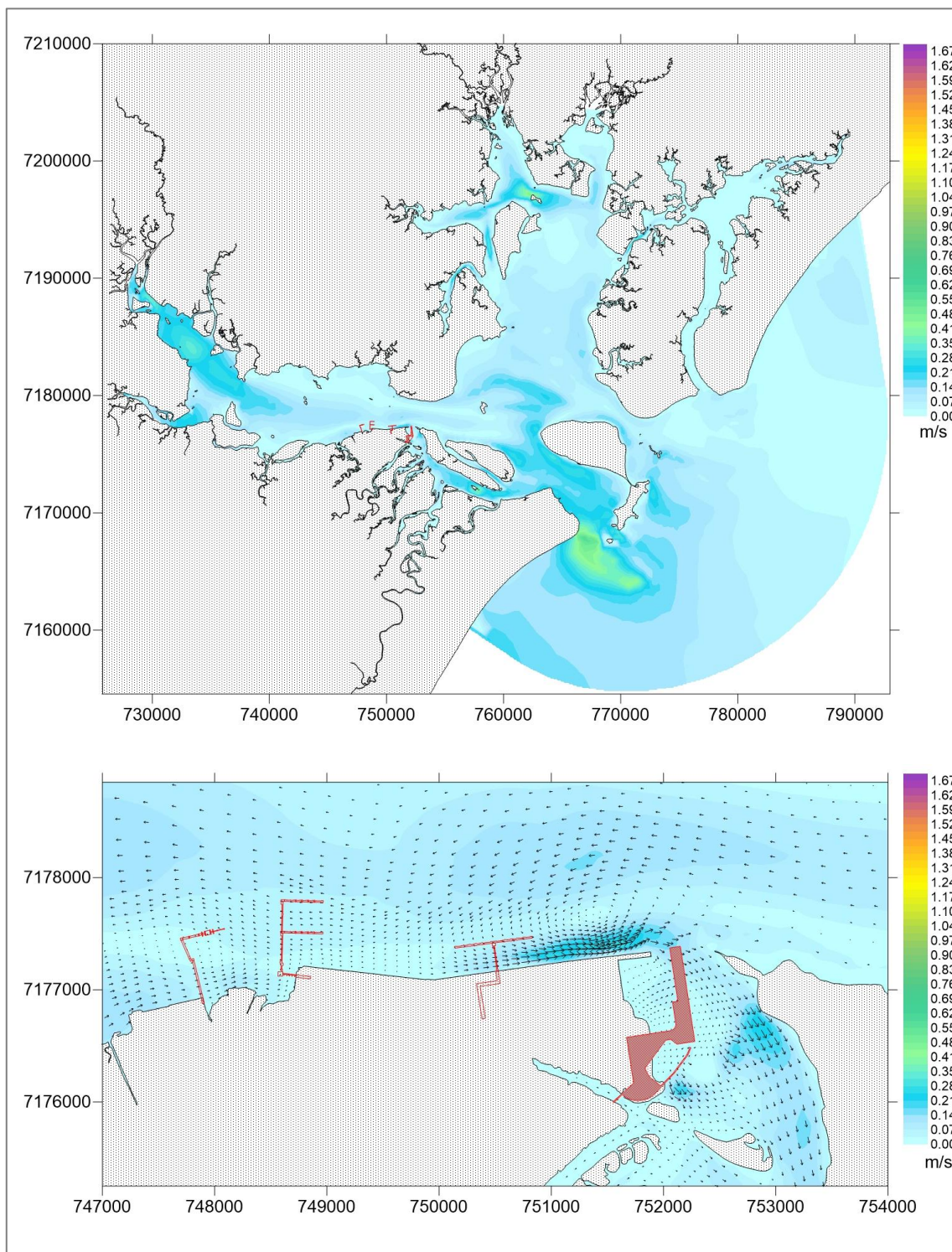


**Figura 143 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré vazante – sizígia – Cenário Prog-L – Verão.**



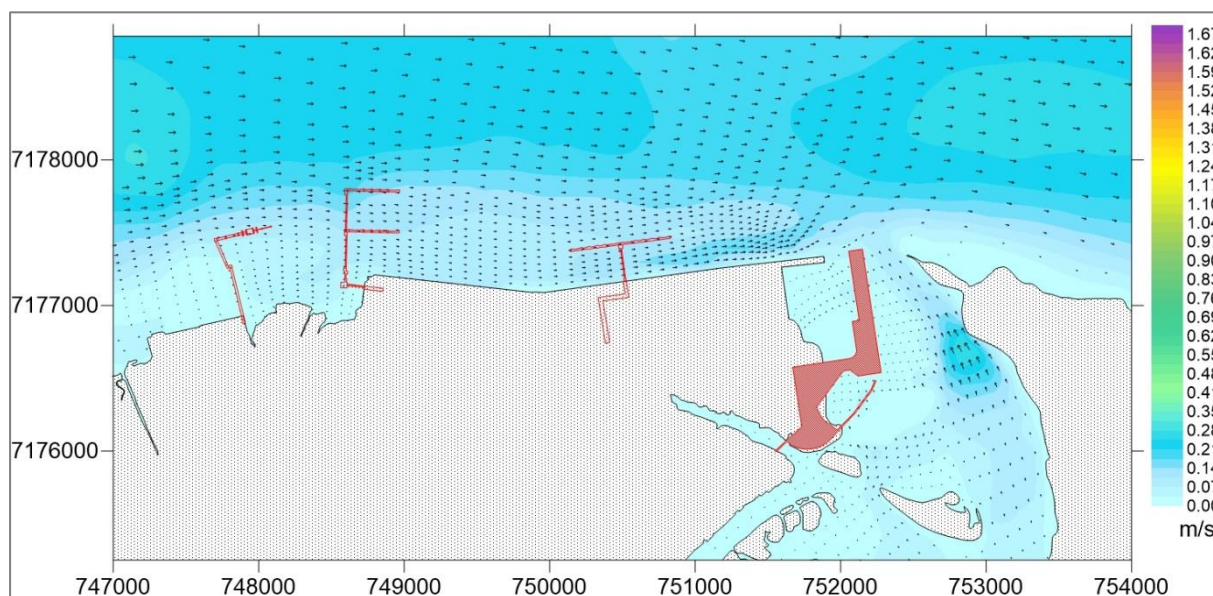


**Figura 144 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré enchente – sizígia – Cenário Prog-L – Verão.**

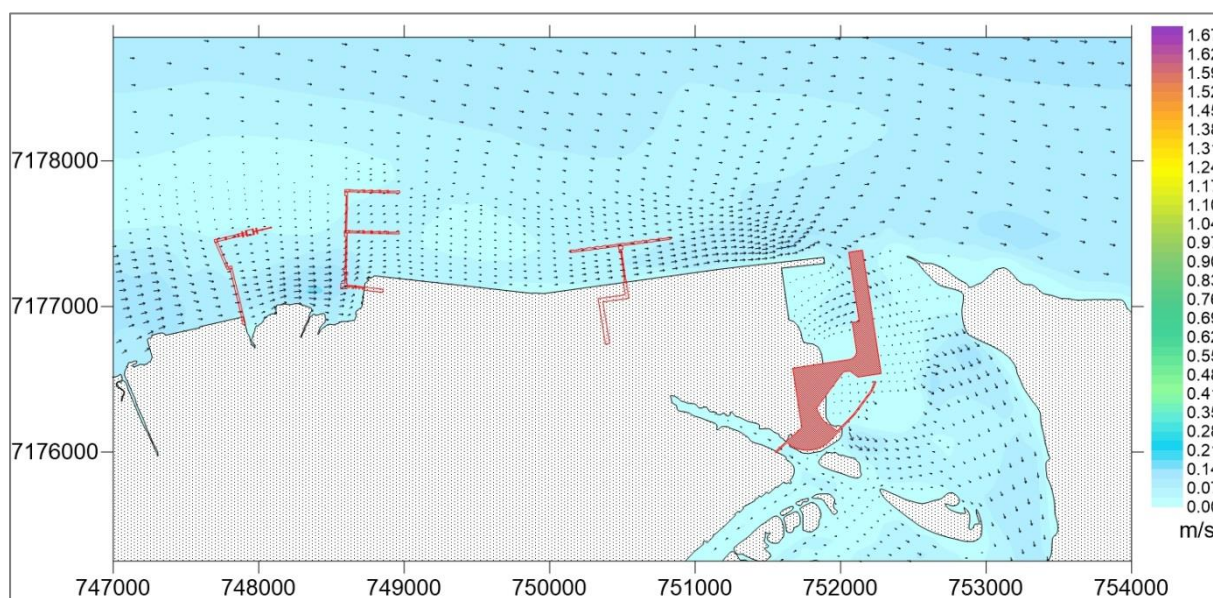


**Figura 145 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de preamar – quadratura – Cenário Prog-L – Verão. Acima, resultados para toda a baía; abaixo, zoom na área de interesse.**



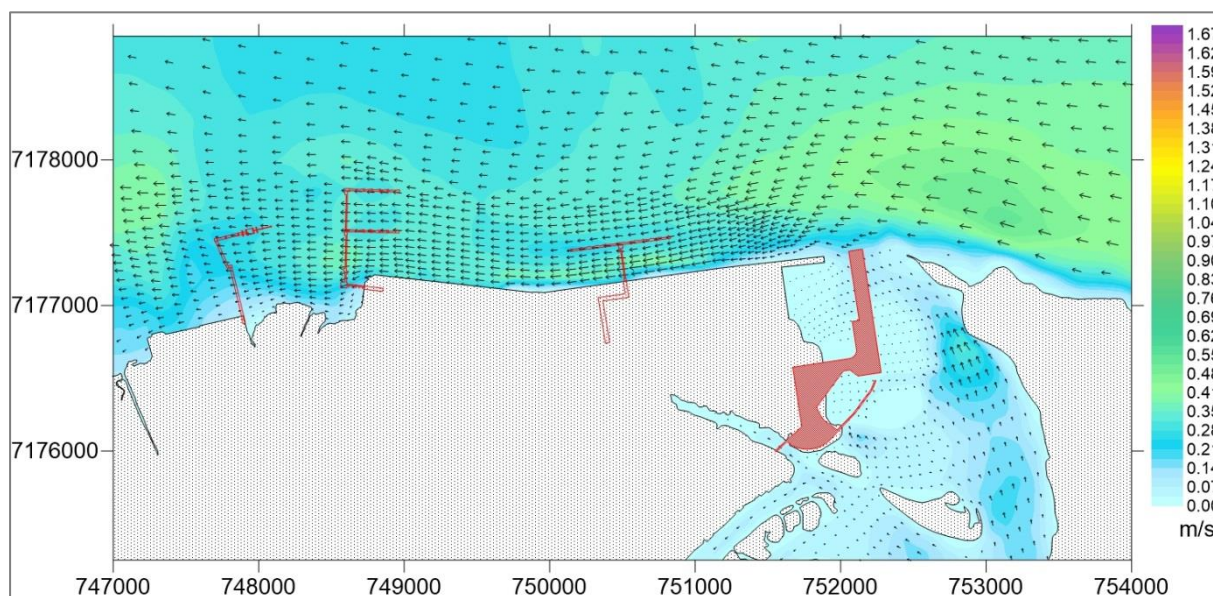


**Figura 146 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de baixamar – quadratura – Cenário Prog-L – Verão.**

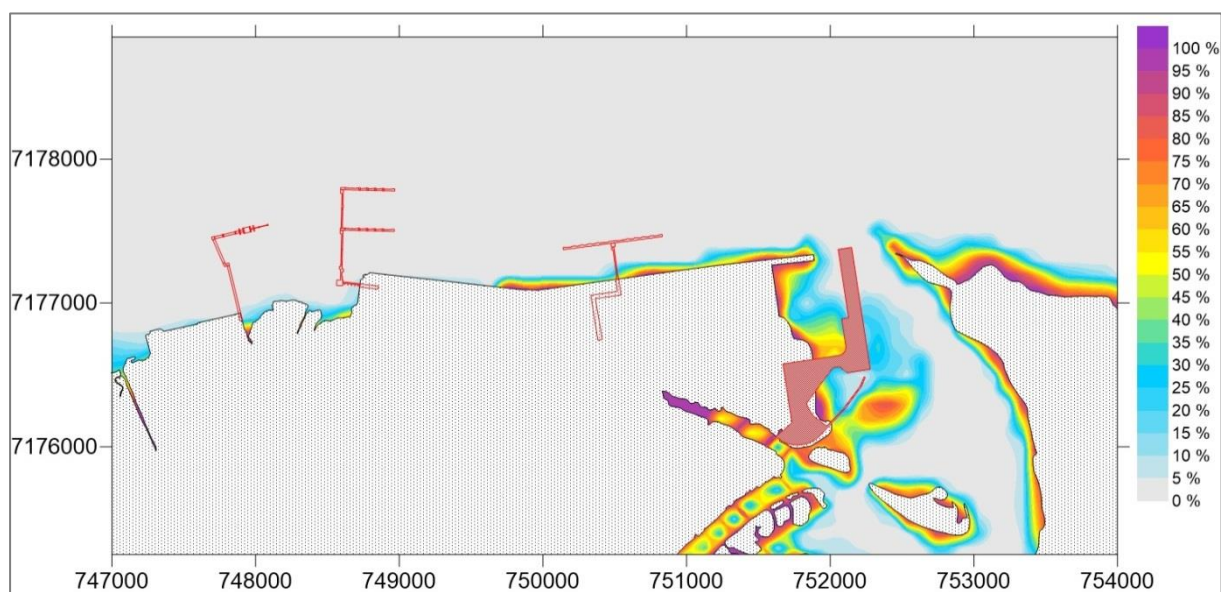


**Figura 147 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré vazante – quadratura – Cenário Prog-L – Verão.**

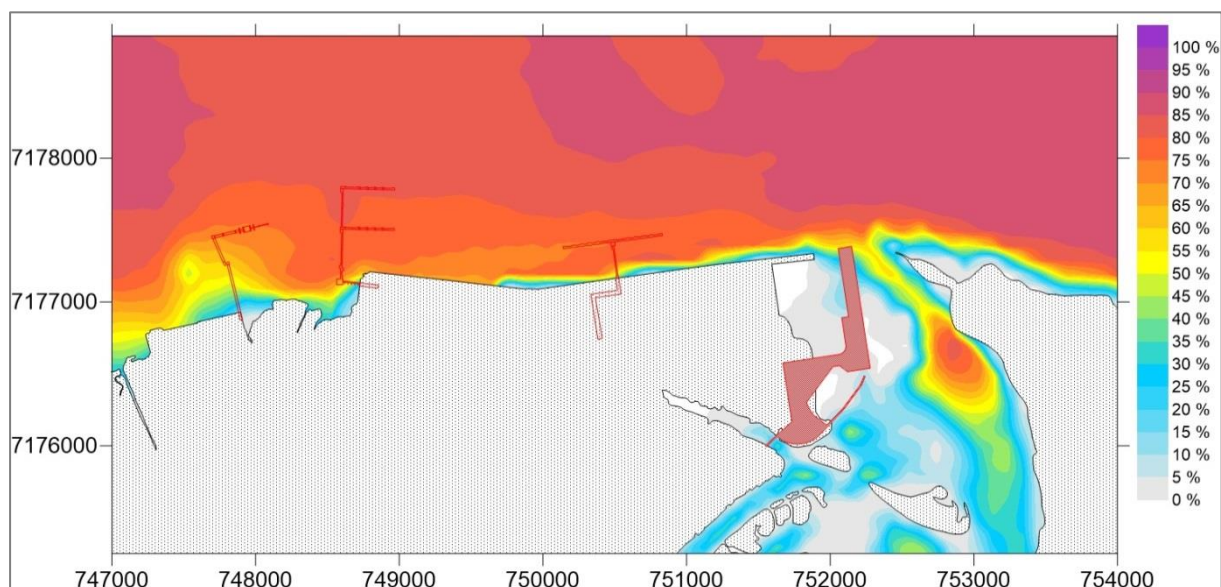




**Figura 148 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré enchente – quadratura – Cenário Prog-L – Verão.**



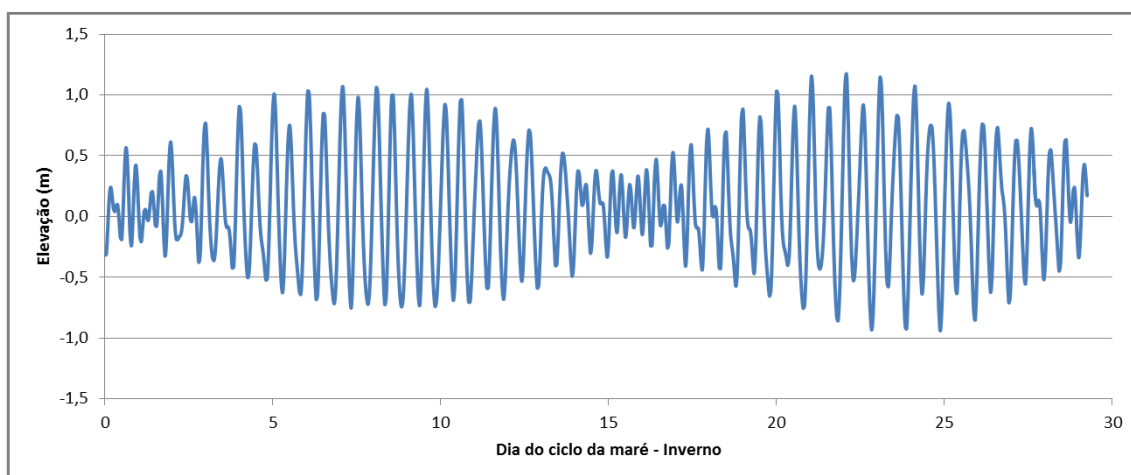
**Figura 149 – Probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente menores do que 0,01 m/s no Complexo Estuarino Paranaguá – Cenário Prog-L – Verão.**



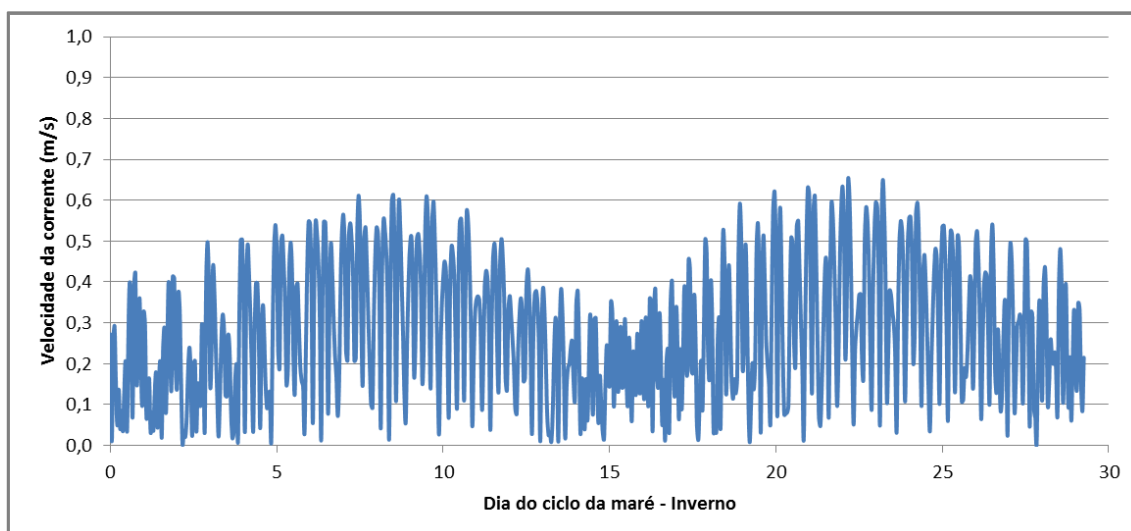
**Figura 150 – Probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente maiores do que 0,1 m/s no Complexo Estuarino Paranaguá – Cenário Prog-L – Verão.**

#### 1.4.10 Resultados de hidrodinâmica para o Cenário Prog-L-Inverno

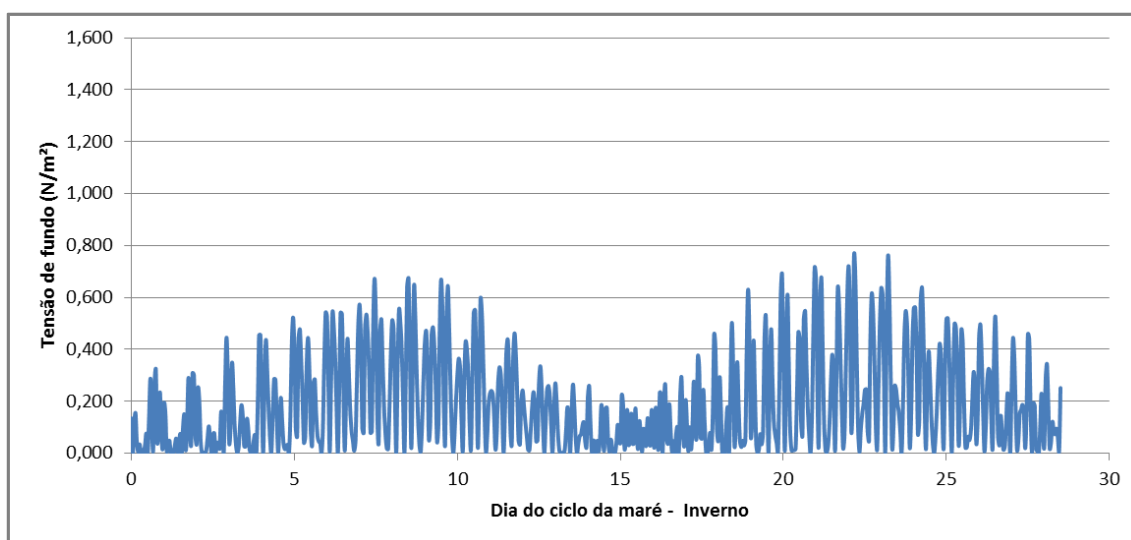
Para o Cenário Prog-L – Inverno, as séries temporais de elevação da superfície livre, velocidades de corrente e tensão no fundo são apresentadas da Figura 151 até a Figura 153. Para o ponto de referência, os valores observados são semelhantes aos do cenário anterior – a elevação varia entre -0,9 m e 1,1 m, enquanto as velocidades de corrente e o módulo de tensões no fundo máximas são da ordem de 0,60 m/s e 0,7 N/m<sup>2</sup>, respectivamente.



**Figura 151 – Série temporal de elevação – Cenário Prog-L – Inverno.**





**Figura 152 – Série temporal de velocidade de corrente – Cenário Prog-L– Inverno.**



**Figura 153 – Série temporal de tensão no fundo – Cenário Prog-L – Inverno.**

Novamente, com base na série temporal de elevação, foram definidos os pontos para análise das distribuições espaciais – apresentados na Tabela 16. Para o Inverno, as distribuições espaciais das velocidades de corrente são apresentadas da Figura 154 até a Figura 161. De acordo com os resultados, em sizígia, para as situações de meia-maré vazante e enchente, as velocidades de corrente são da ordem de 0,70 m/s. Para preamar, as máximas velocidades se aproximam de 0,5 m/s enquanto que, em baixamar as velocidades não ultrapassam 0,3 m/s. Em quadratura, dentro da área de interesse, predominam velocidades menores que 0,4 m/s, exceto para meia-maré vazante, quando as velocidades são da ordem de 0,6 m/s.

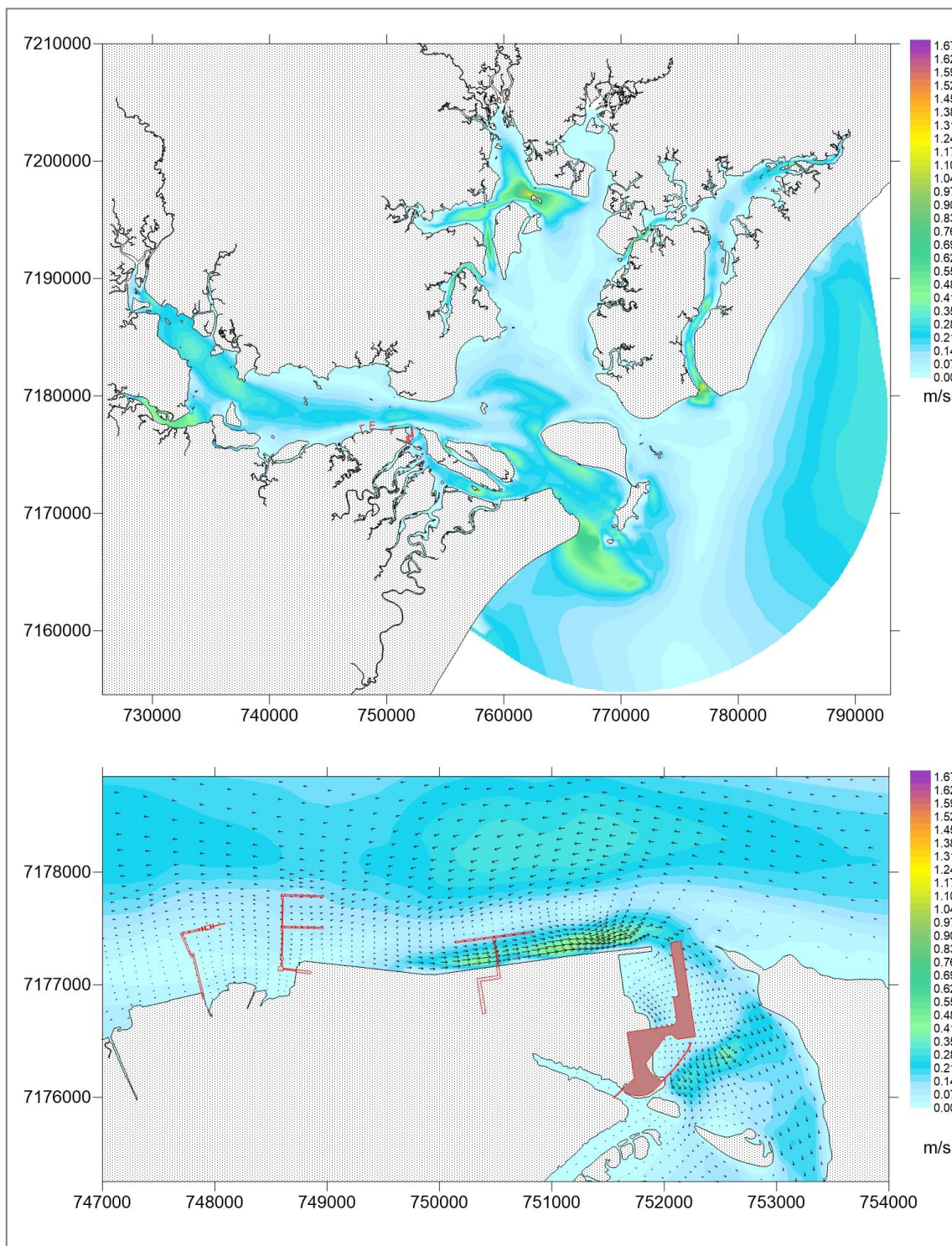


 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	146

**Tabela 16 – Elevação, módulo da velocidade de corrente e tensão no fundo no ponto de referência para os períodos selecionados para análise das distribuições espaciais – Cenário Prog-L – Inverno.**

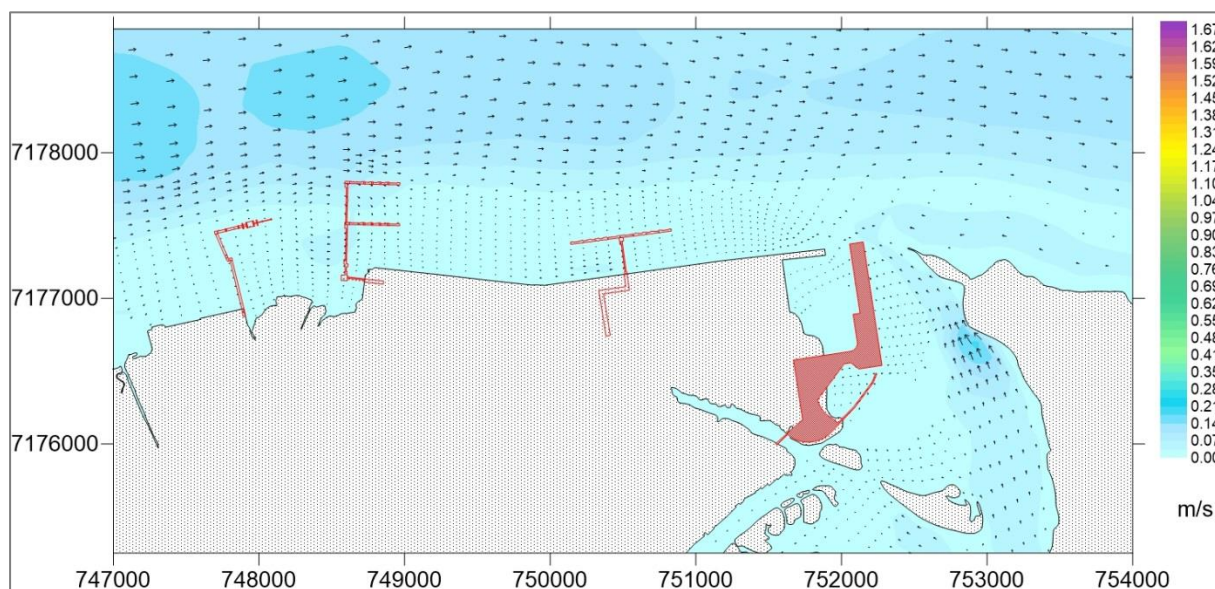
Situação		Dia do ciclo de maré e hora	Elevação (m)	Velocidade de corrente (m/s)	Tensão no fundo (N/m <sup>2</sup> )
Sizígia	Meia-maré Enchente	Dia 23 - 0:00	-0,0101	0,2895	0,1515
	Meia-maré Vazante	Dia 22 - 19:00	-0,0779	0,6080	0,6689
	Preamar	Dia 22 - 16:00	1,1719	0,2156	0,0828
	Baixamar	Dia 22 - 10:00	-0,8560	0,0991	0,0179
Quadratura	Meia-maré Enchente	Dia 15 - 21:00	0,0165	0,1775	0,0569
	Meia-maré Vazante	Dia 16 - 1:00	-0,0247	0,3089	0,1726
	Preamar	Dia 15 - 23:00	0,3444	0,1416	0,0361
	Baixamar	Dia 15 - 14:00	-0,2076	0,1447	0,0380

A Figura 162 apresenta as probabilidades de ocorrência de velocidades menores do que 0,01 m/s enquanto a Figura 163 apresenta as probabilidades de ocorrência de velocidades maiores do que 0,1 m/s durante o ciclo típico de maré de inverno. Resultados semelhantes aos do Cenário Prog-F – Inverno foram obtidos tanto para altas quanto baixas velocidades de corrente.

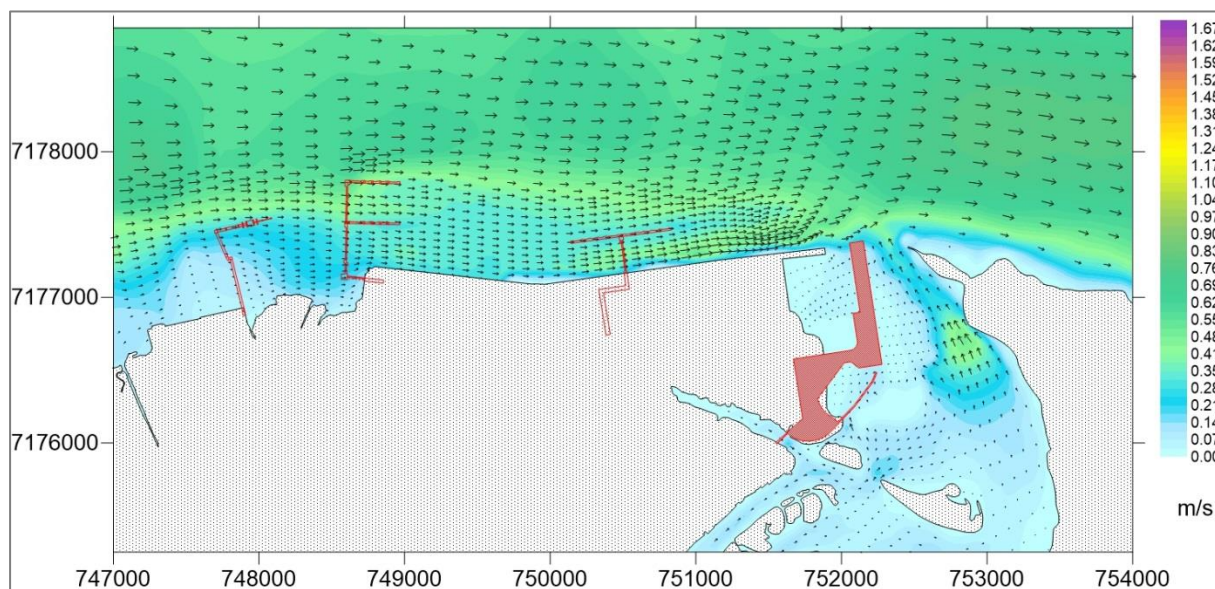


**Figura 154 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de preamar – sizígia – Cenário Prog-L– Inverno. Acima, resultados para toda a baía; abaixo, zoom na área de interesse.**



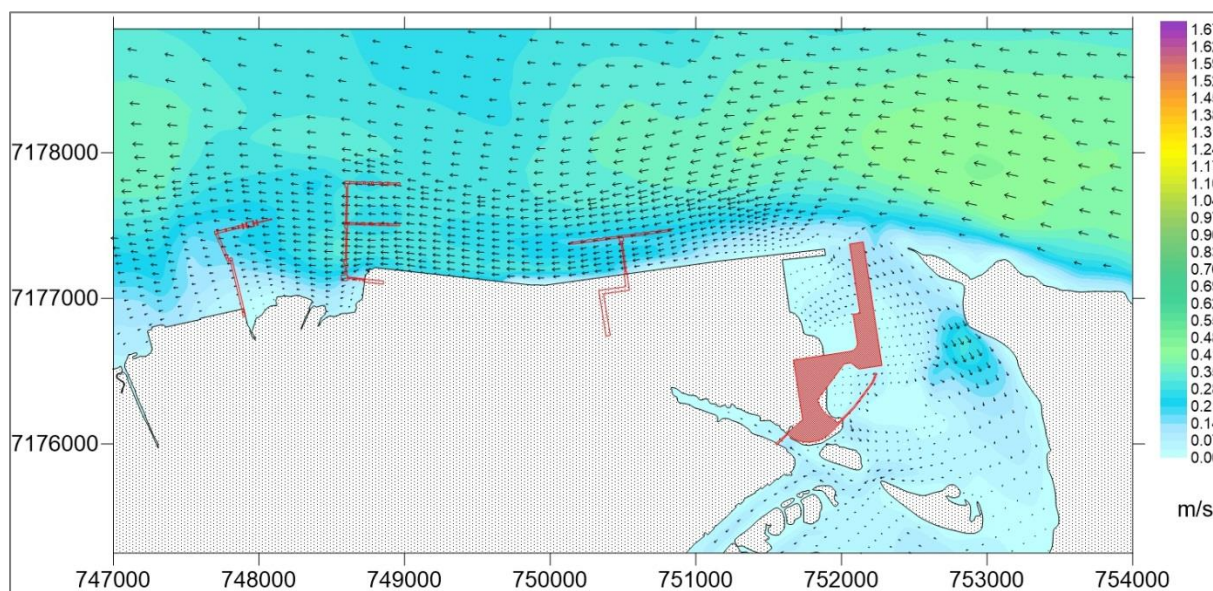


**Figura 155 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de baixamar – sizígia – Cenário Prog-L – Inverno.**

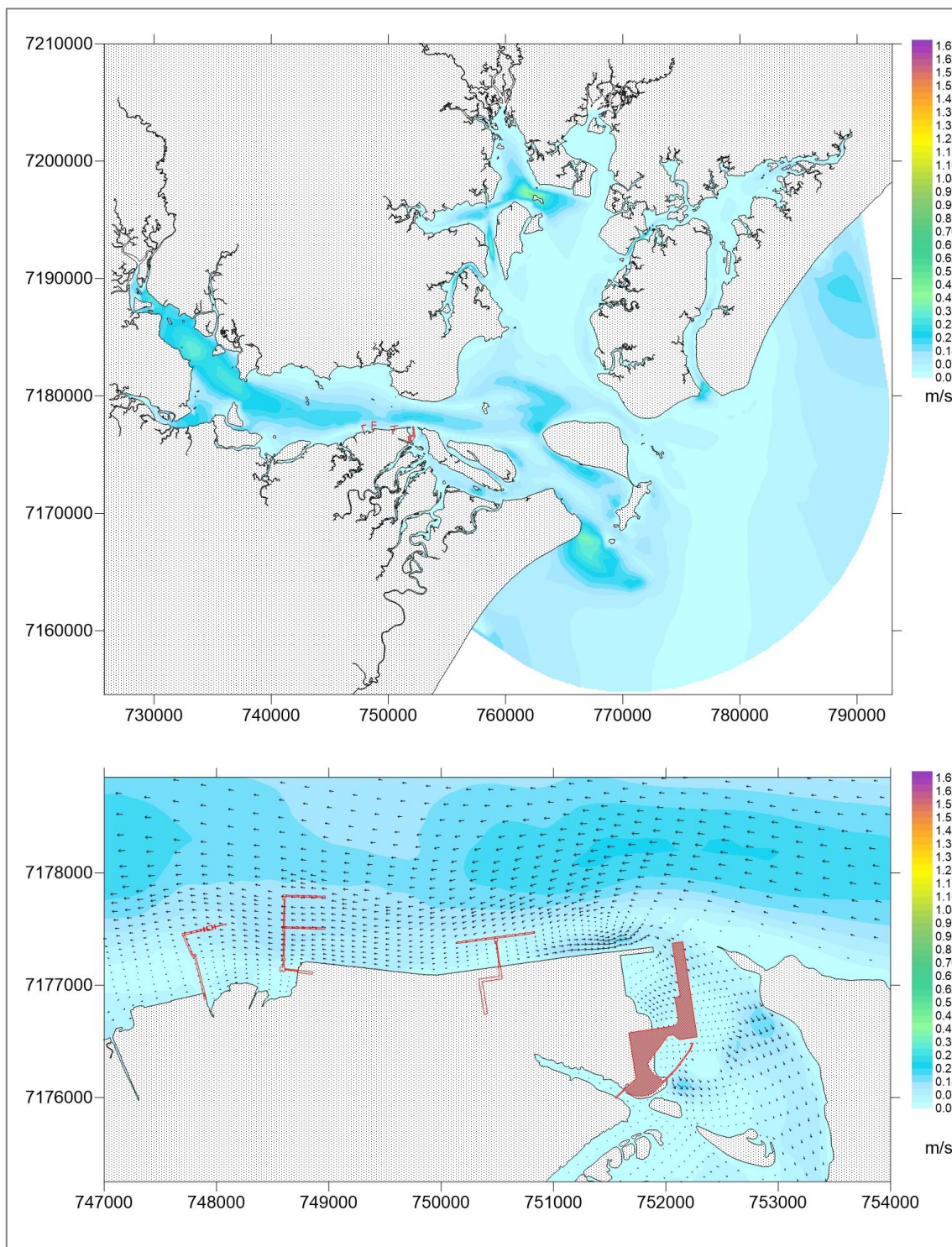


**Figura 156 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré vazante – sizígia – Cenário Prog-L – Inverno.**



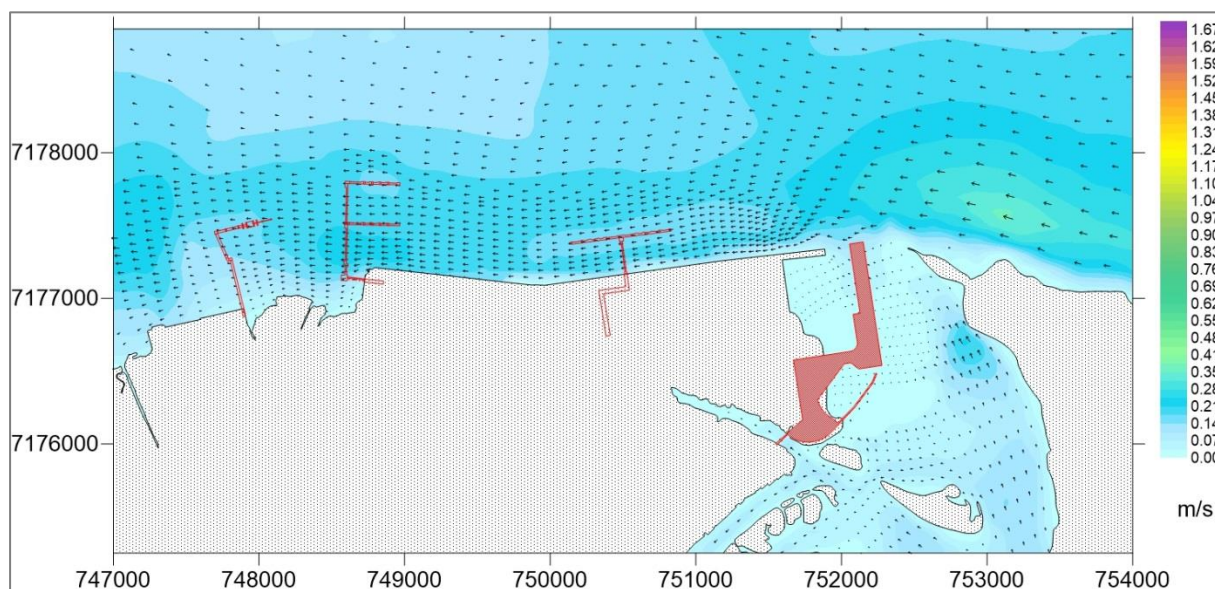


**Figura 157 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré enchente – sizígia – Cenário Prog-L – Inverno.**

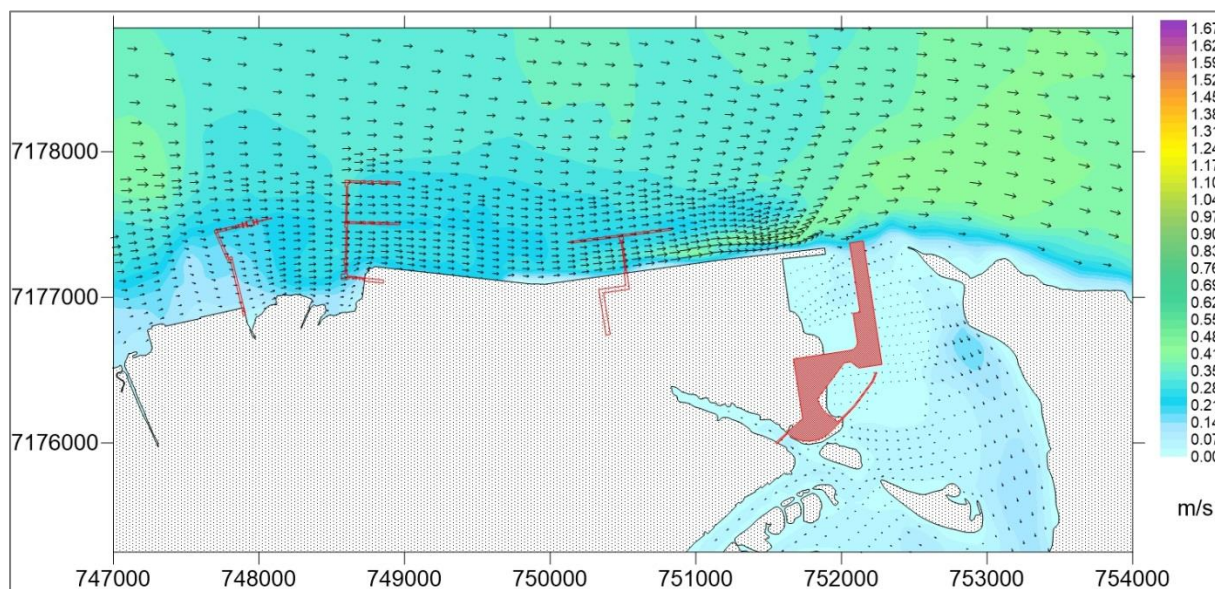


**Figura 158 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de preamar – quadratura – Cenário Prog-L – Inverno. Acima, resultados para toda a baía; abaixo, zoom na área de interesse.**



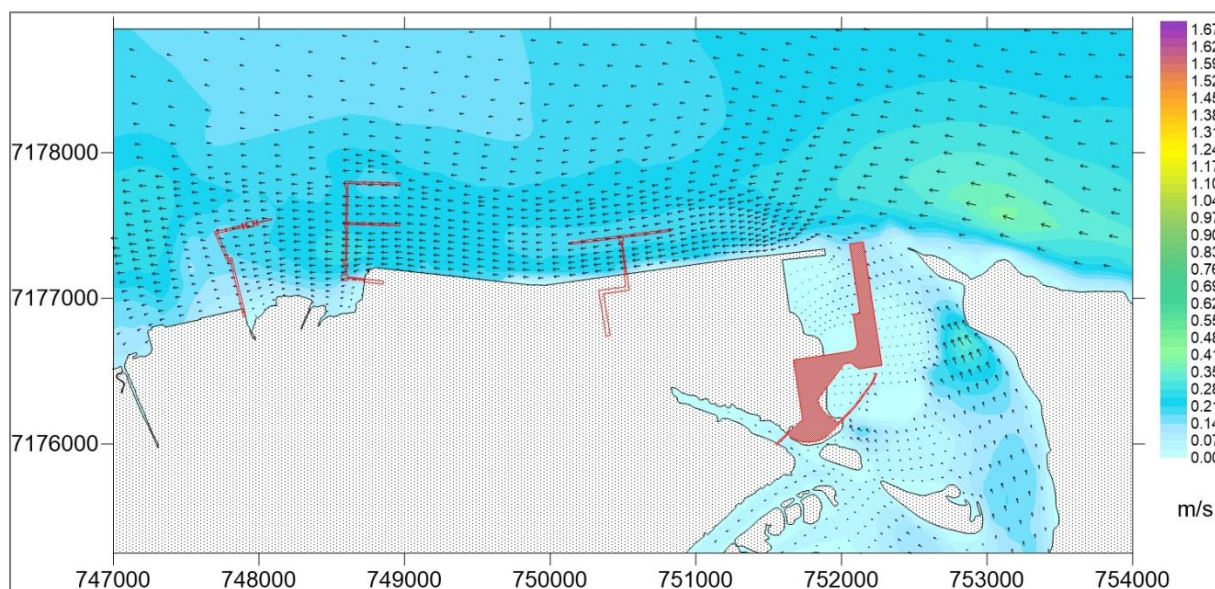


**Figura 159 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de baixamar – quadratura – Cenário Prog-L – Inverno.**

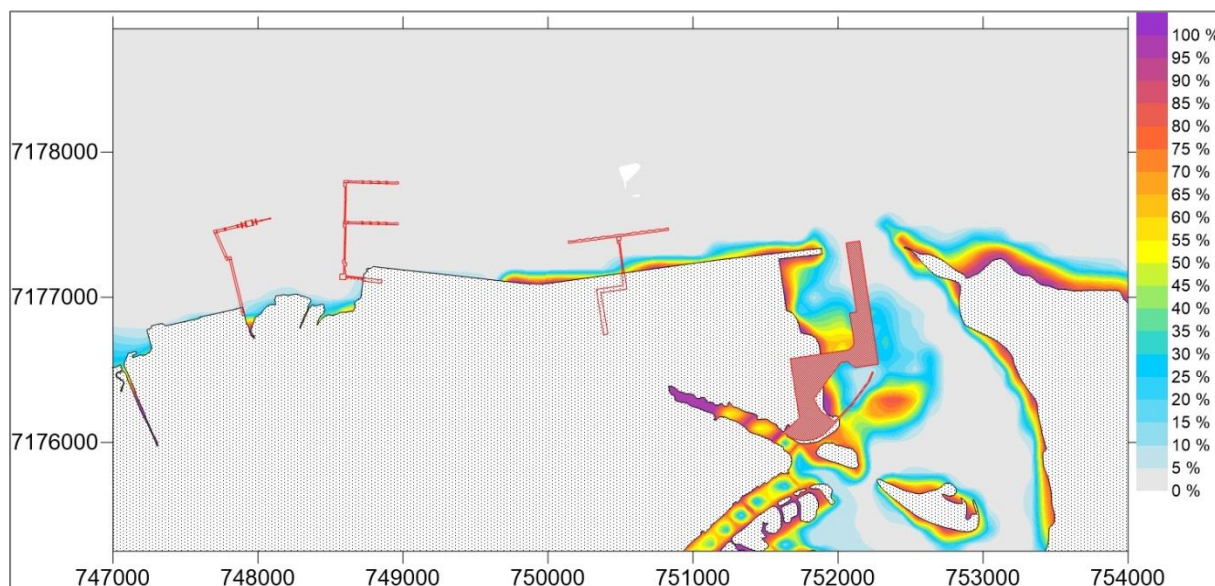


**Figura 160 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré vazante – quadratura – Cenário Prog-L – Inverno.**

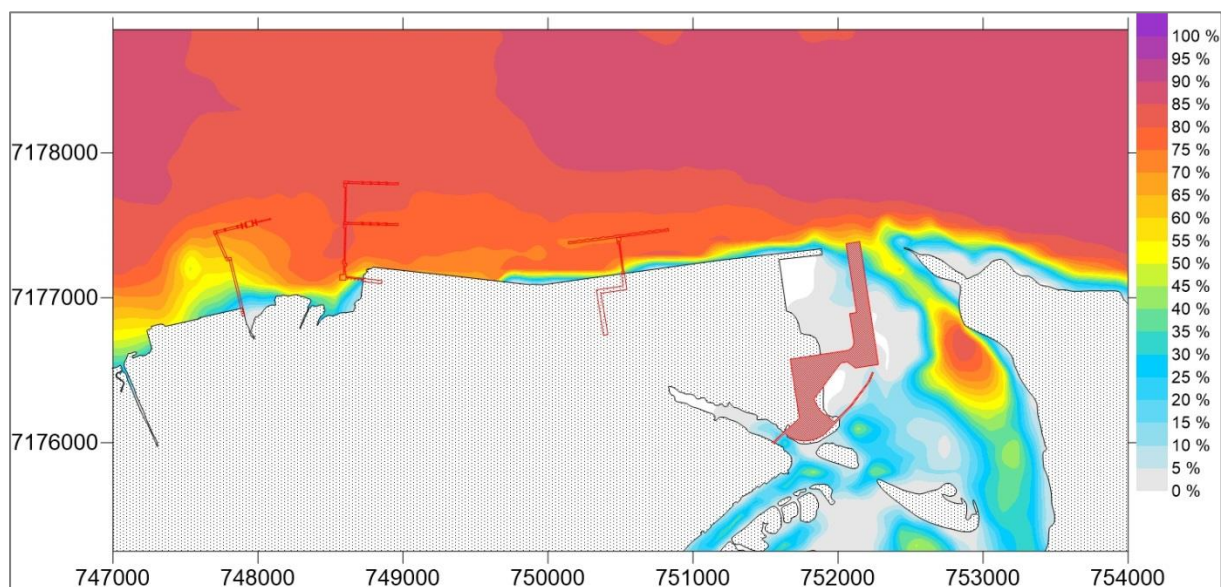




**Figura 161 – Velocidades de corrente (m/s) durante uma ocorrência de meia-maré enchente – quadratura – Cenário Prog-L – Inverno.**



**Figura 162 – Probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente menores do que 0,01 m/s no Complexo Estuarino Paranaguá – Cenário Prog-L – Inverno.**

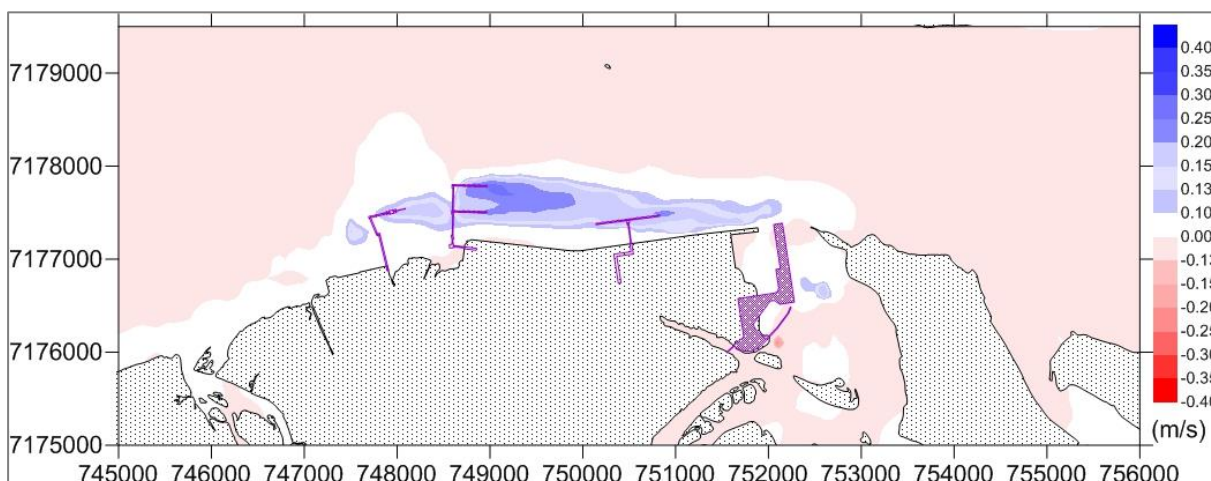


**Figura 163 – Probabilidades de ocorrência de velocidades de corrente maiores do que 0,1 m/s no Complexo Estuarino Paranaguá – Cenário Prog-L – Inverno.**

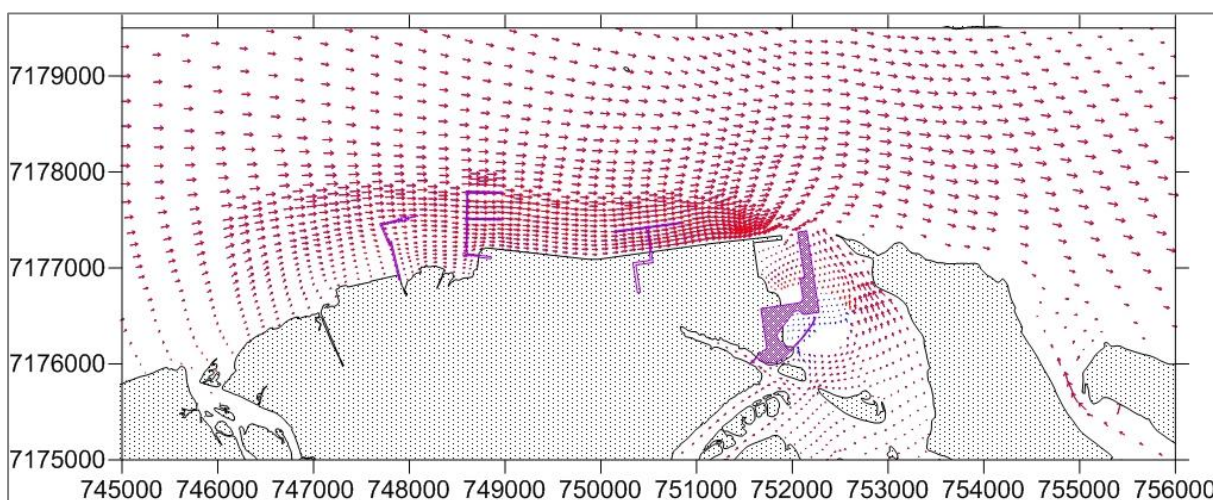
#### 1.4.11 Mudanças na hidrodinâmica da região de interesse

Para avaliar as alterações na hidrodinâmica do estuário, foi calculada a diferença entre as velocidades e direções de corrente dos cenários de diagnóstico (Diag) e dos cenários finais (Prog-L) para períodos meia-maré vazante em sizígia. As maiores diferenças de velocidade de corrente entre os dois cenários ocorrem nas áreas dragadas (aprofundadas) e são da ordem de 0,4 m/s, e são mais evidentes no Inverno. Como as velocidades do cenário de prognóstico são subtraídas das velocidades do cenário de diagnóstico, há uma redução de velocidade nas proximidades das áreas aprofundadas (tanto no Verão quanto no Inverno), um pequeno aumento de velocidade nas áreas mais distantes dos empreendimentos (Verão). Em relação às direções da corrente, observam-se mudanças relevantes apenas na área do Complexo Náutico – atualmente, parte da área de dragagem relacionada ao Complexo Náutico forma um grande banco de areia, que dependendo do nível da superfície livre, fica exposto.

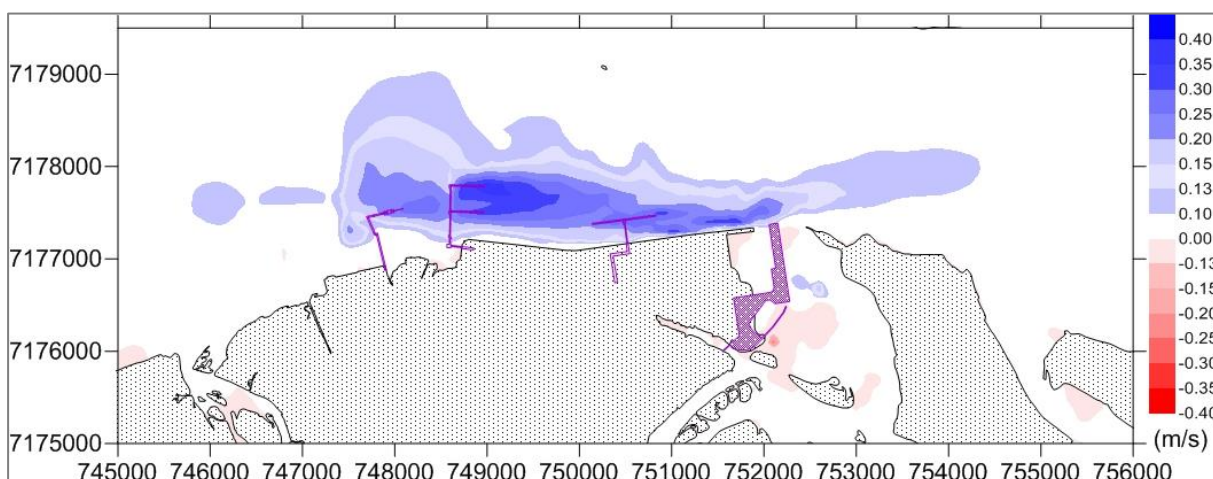




**Figura 164 – Diferença entre as velocidades de corrente dos cenários Diag-Verão e Prog-L - Verão durante ocorrência de meia-maré vazante – sizígia.**

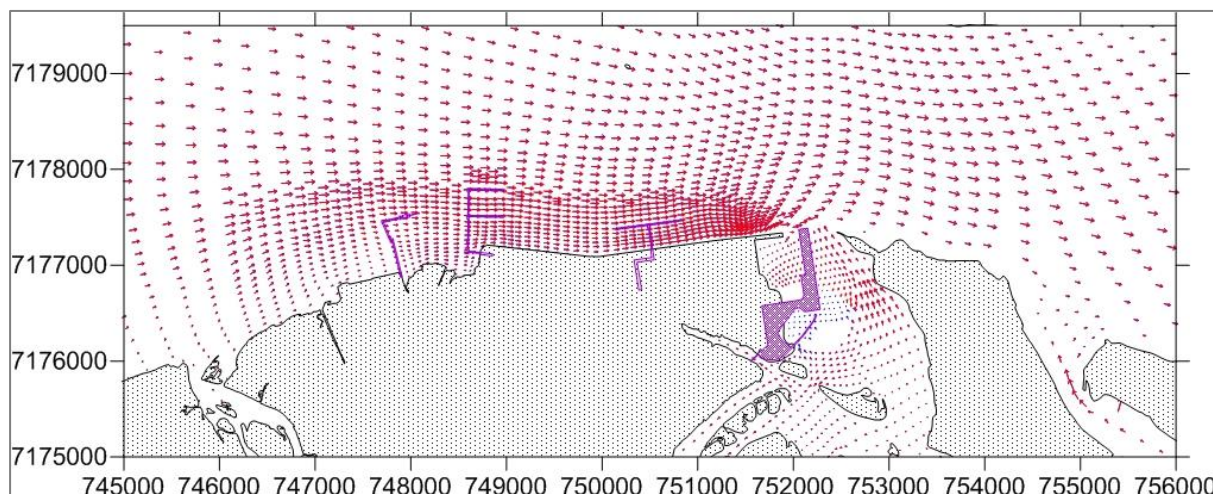


**Figura 165 – Diferença entre as direções das velocidades de corrente dos cenários Diag-Verão e Prog-L - Verão durante ocorrência de meia-maré vazante – sizígia.**



**Figura 166 – Diferença entre as velocidades de corrente dos cenários Diag-Inverno e Prog-L - Inverno durante ocorrência de meia-maré vazante – sizígia.**







**Figura 167 – Diferença entre as direções das velocidades de corrente dos cenários Diag-Inverno e Prog-L - Inverno durante ocorrência de meia-maré vazante – sizígia.**

## 1.5 Resultados do Modelo de Transporte de Sedimentos

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações da evolução morfológica de fundo (transporte de sedimentos) da baía de Paranaguá para os cenários de diagnóstico e de prognóstico. O objetivo destas simulações é avaliar a dinâmica dos sedimentos do fundo da baía; para realizar essas simulações, são utilizados os resultados das simulações da circulação hidrodinâmica (apresentados em seções anteriores). Deve-se lembrar que, em função das aproximações necessárias para a realização das simulações, os resultados apresentados aqui representam um indicativo do que pode ocorrer e devem ser avaliados de forma qualitativa.

As simulações de diagnóstico foram realizadas para os 10 cenários de hidrodinâmica descritos na seção 1.3.4. Para os cenários de hidrodinâmica foram simulados ciclos de maré típicos de verão e de inverno, cada um com aproximadamente 29,25 dias. Com o objetivo de estimar o que ocorre em um período mais longo, para o transporte de sedimentos, foram realizadas simulações considerando períodos de 365 dias (aproximadamente 12,5 ciclos de maré). Para essas simulações são apresentados resultados temporais de vazão sólida total de sedimentos (no ponto de referência da Figura 32), além de resultados espaciais de isolinhas de profundidade e probabilidades de ocorrência de tensão no fundo maiores do que  $1,0 \text{ N/m}^2$ . O tempo escolhido para representar as isolinhas de profundidade é o tempo final da simulação, o qual representa as alterações do fundo em termos de transporte de sedimentos após 365 dias de simulação.

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	156

Uma vez que se quer identificar regiões com maiores possibilidades de modificação nas taxas de erosão/deposição de sedimentos, é importante avaliar variáveis como a tensão no fundo ( $N/m^2$ ) – regiões onde a tensão é maior são mais propícias a sofrerem erosão quando se considera uma mesma distribuição inicial de sedimentos. Em relação a vazão sólida total por unidade de comprimento ( $ton/d/m$ ) espera-se que quanto maior seu valor, maior será a erosão.

Nesse contexto, para cada um dos cenários, na sequência são apresentados resultados obtidos a partir das simulações realizadas.

### 1.5.1 Resultados para os cenários Diag-Verão e Diag Inverno

Nesse contexto, a Figura 168 e a Figura 169 apresentam as séries temporais de vazão sólida total respectivamente para os cenários Diag – Verão e Diag – Inverno no ponto de referência da Figura 32 – observam-se valores máximos da ordem de 35  $ton/d/m$  no Inverno e de 40  $ton/d/m$  no Verão; observa-se também, que as variações de vazão total são cíclicas e tendem a acompanhar o ciclo de elevação da maré. Se comparadas com as séries de tensão no fundo, apresentadas na Figura 36 e na Figura 49, observa-se uma correspondência entre os tempos em que ocorrem as maiores tensões e os maiores valores de vazão sólida total. Ainda, é possível fazer uma relação com as velocidades de corrente e com a posição da superfície livre resultantes das simulações hidrodinâmicas – maiores valores de nível da superfície livre, bem como de velocidades de corrente correspondem, aproximadamente, aos períodos de maior tensão no fundo e conseqüentemente de maior vazão sólida. Pelas séries temporais é possível observar que as taxas de erosão e deposição são dinâmicas, e ocorrem em períodos alternados.

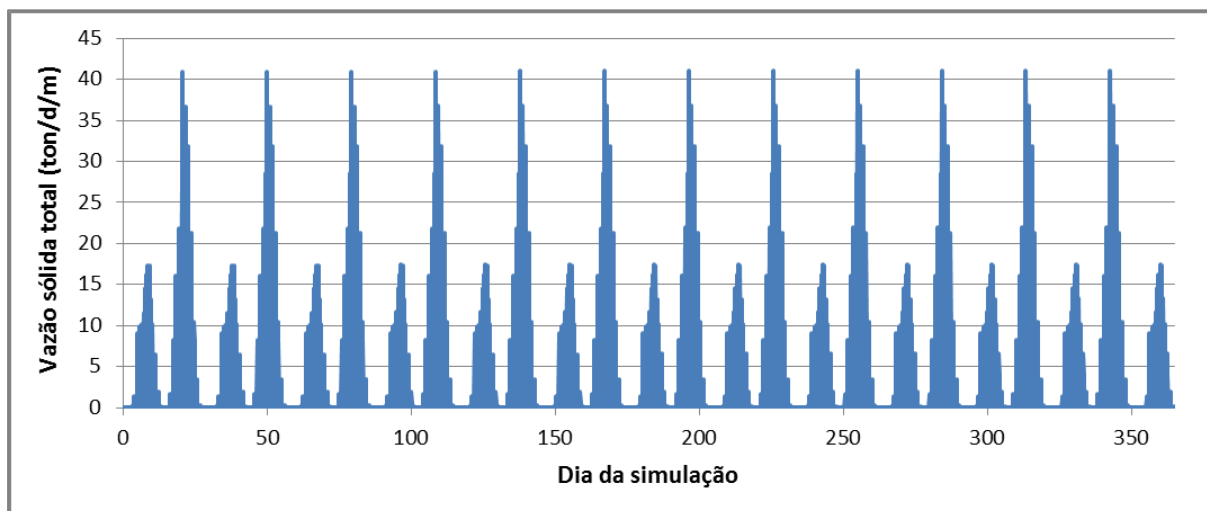


Figura 168 - Vazão sólida total (ton/d/m) no ponto de interesse – Cenário Diag – Verão.

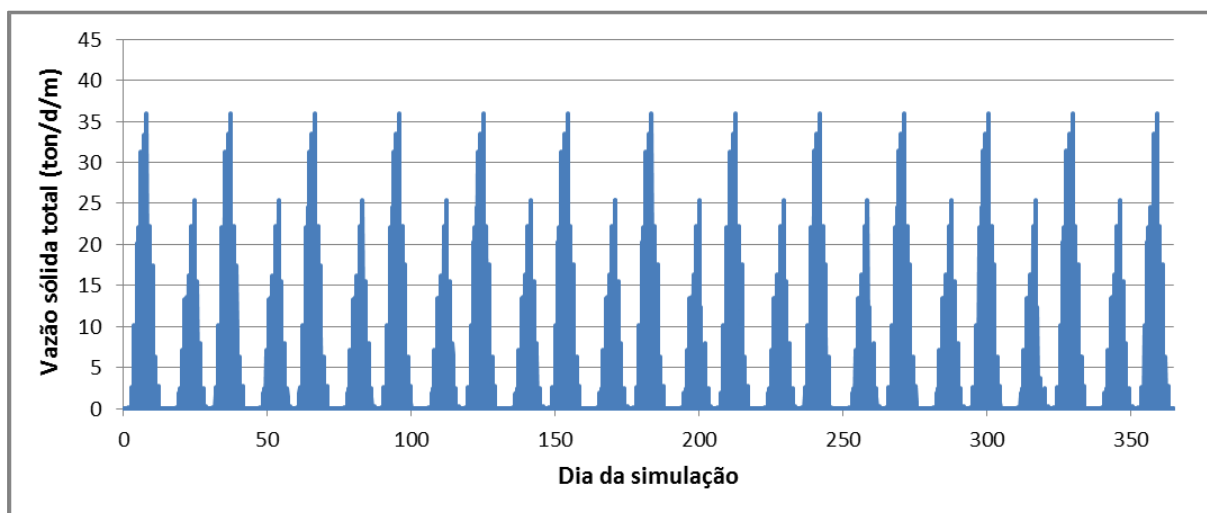


Figura 169 - Vazão sólida total (ton/d/m) no ponto de interesse – Cenário Diag – Inverno.

Na Figura 170 (Verão) e na Figura 171 (Inverno) são mostradas as distribuições espaciais das variações de profundidade ( $\Delta H$ ) para o período final de simulação (365 dias). Valores positivos (azul) representam erosão enquanto valores negativos (vermelho) representam deposição. As diferenças entre as situações de Verão e Inverno são pequenas. A região de maior erosão, nos momentos apresentados, corresponde à margem da área do Porto de Paranaguá e, nas simulações realizadas chegam a ser da ordem de 1,0 m.



Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
Nº PLANAVE	REV. PLANAVE	158
RL-B00-H01-1001	0	

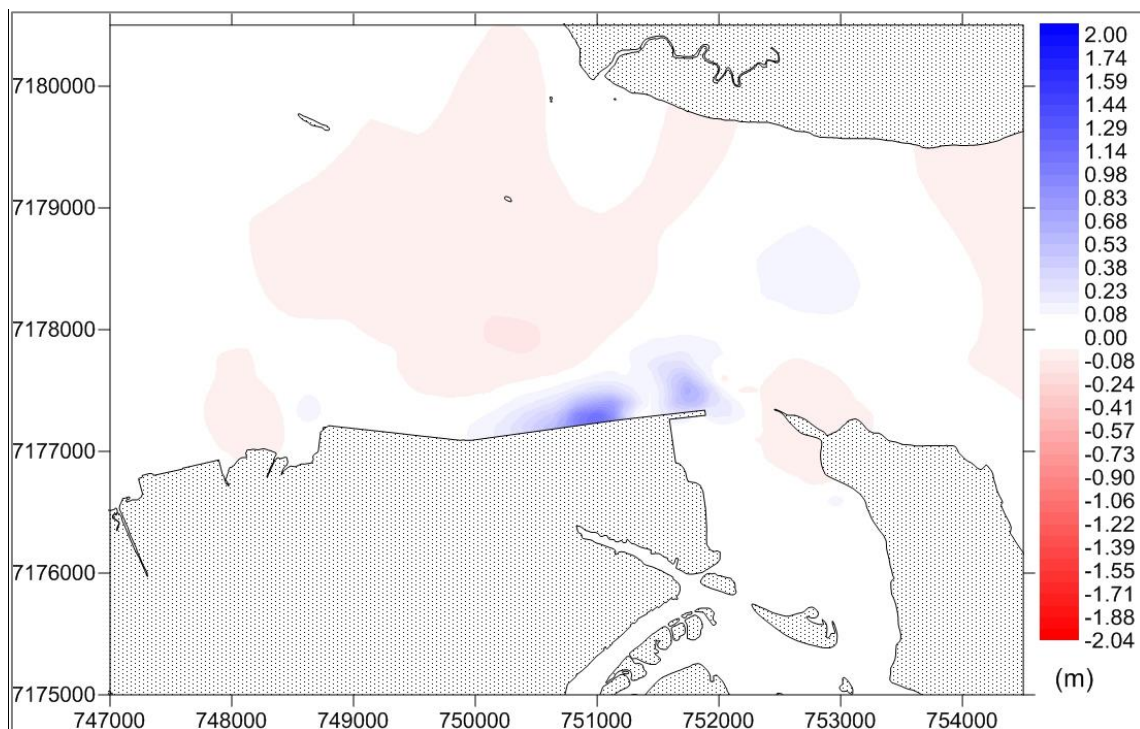


Figura 170 - Isolinhas de variação de profundidade -  $\Delta H$  (m) – Cenário Diag – Verão.

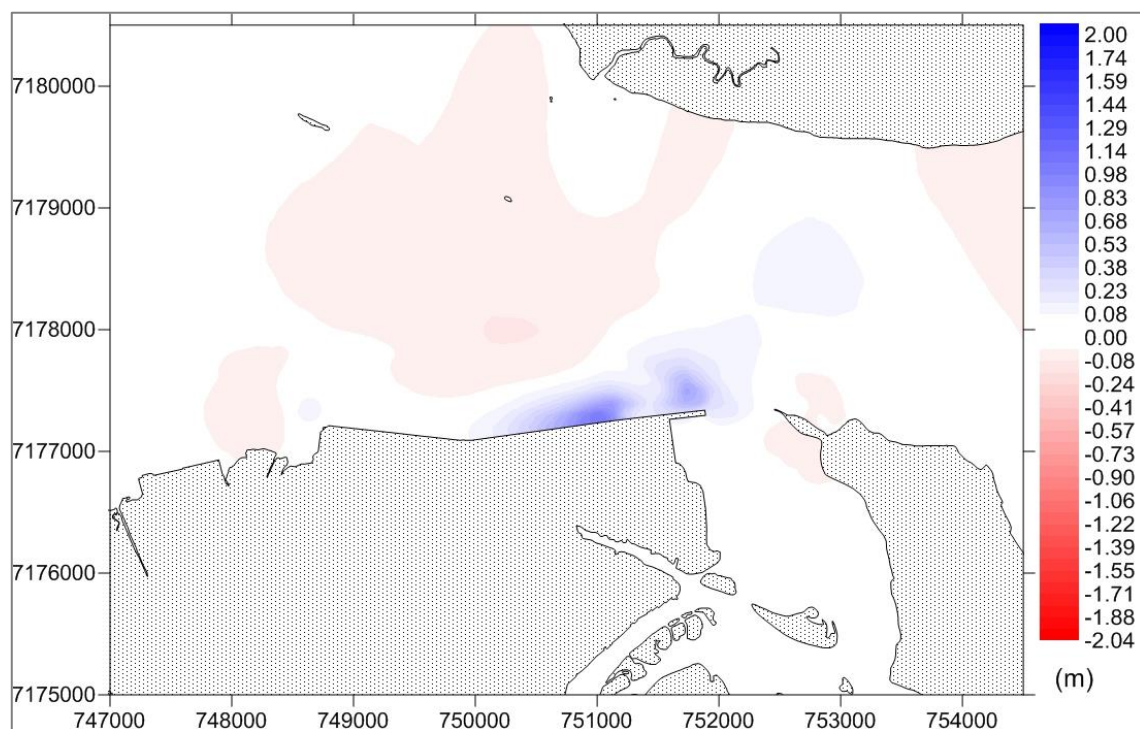


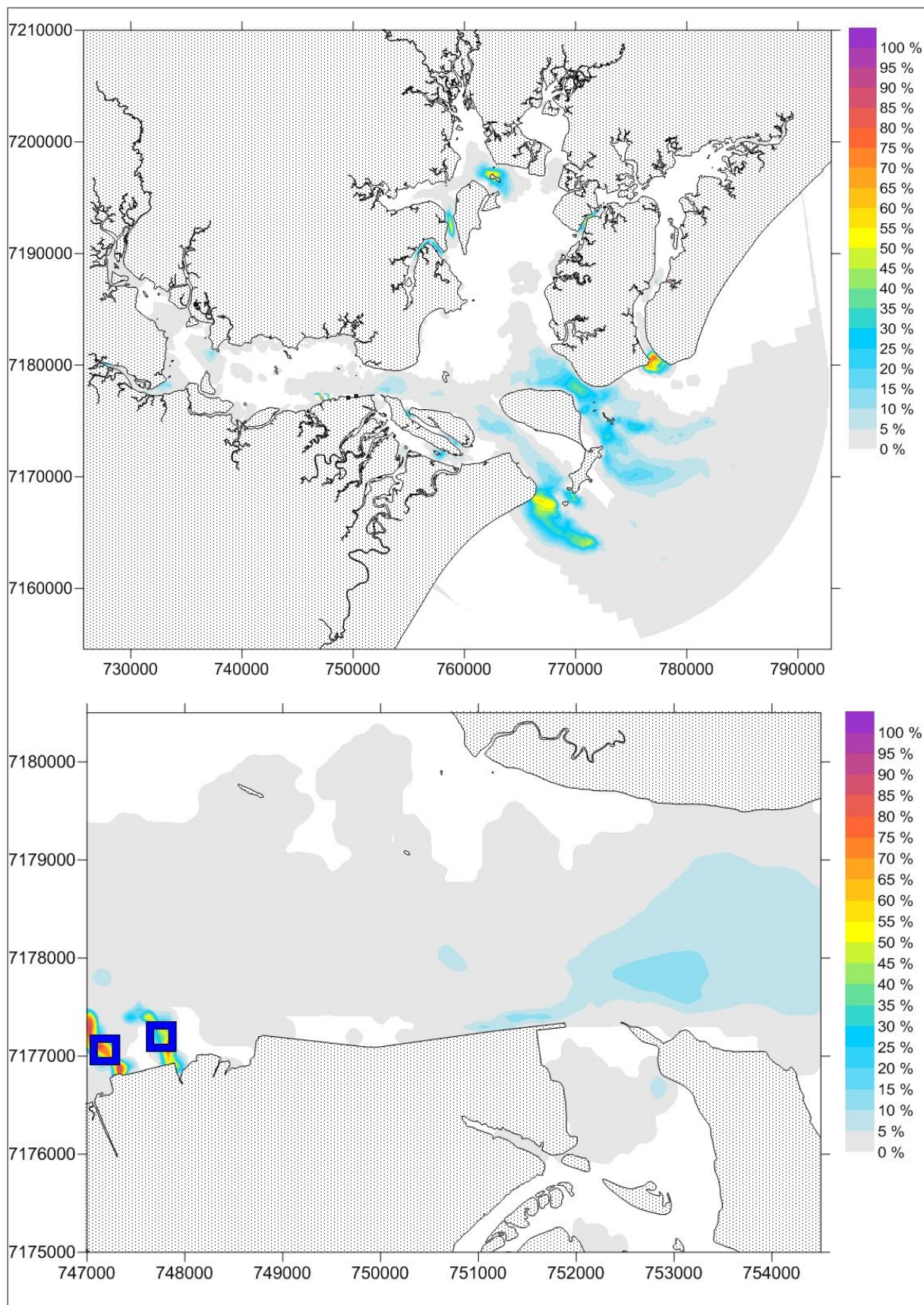


Figura 171 - Isolinhas de variação de profundidade -  $\Delta H$  (m) – Cenário Diag – Inverno.

Para verificar as áreas com mais tendência a sofrer erosão, a Figura 172 apresenta as probabilidades (espaciais) de que a tensão no fundo seja maior do que  $1,0 \text{ N/m}^2$  – esta informação é apresentada para todo o domínio modelado e para a área de interesse desse



 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	159

estudo. Os quadrados azuis representam a localização de estruturas já existentes (píeres) – nas simulações, as estruturas são representadas na forma de tensão, assim num mapa de distribuição de tensões de fundo, suas regiões de influência ficam evidenciadas. Considerando a área mais ao sul da baía de Paranaguá, observa-se que a região onde existe maior probabilidade de ocorrência de tensões altas ( $>1,0 \text{ N/m}^2$ ) é a desembocadura do Canal da Galheta. Na área de interesse desse estudo, considerando esse cenário, a região mais propícia a sofrer erosão localiza-se após a saída/entrada do Canal da Cotinga e as probabilidades de que a tensão no fundo seja maior do que  $1,0 \text{ N/m}^2$  são da ordem de 15%.



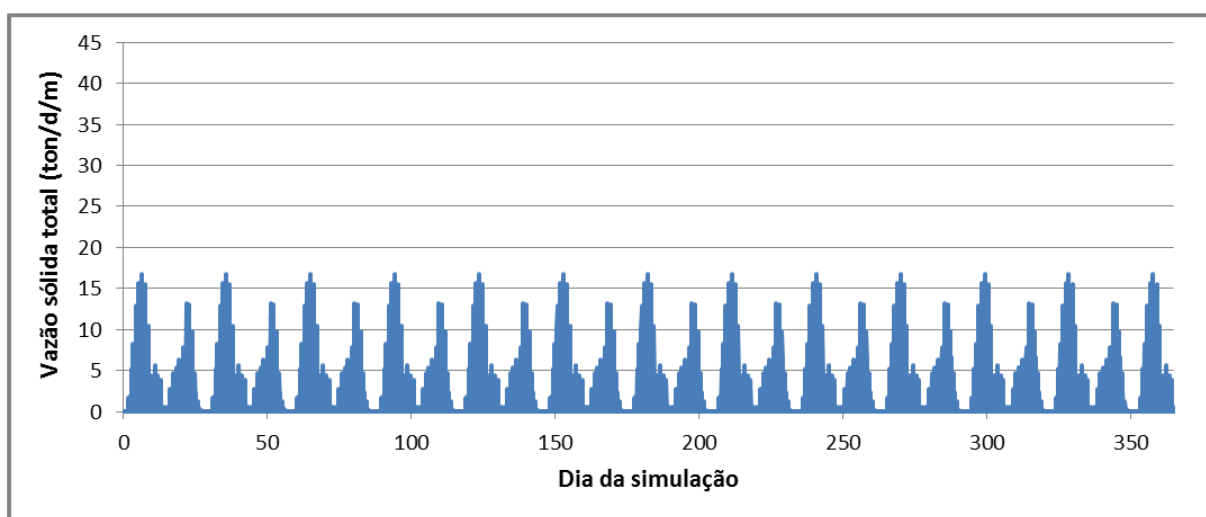
**Figura 172 – Probabilidades de que a tensão no fundo seja maior do que 1,0 N/m<sup>2</sup> – Cenário Diag – acima, para toda a baía de Paranaguá e abaixo, para a região de interesse. Quadrados azuis representam píeres já existentes.**





 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	161

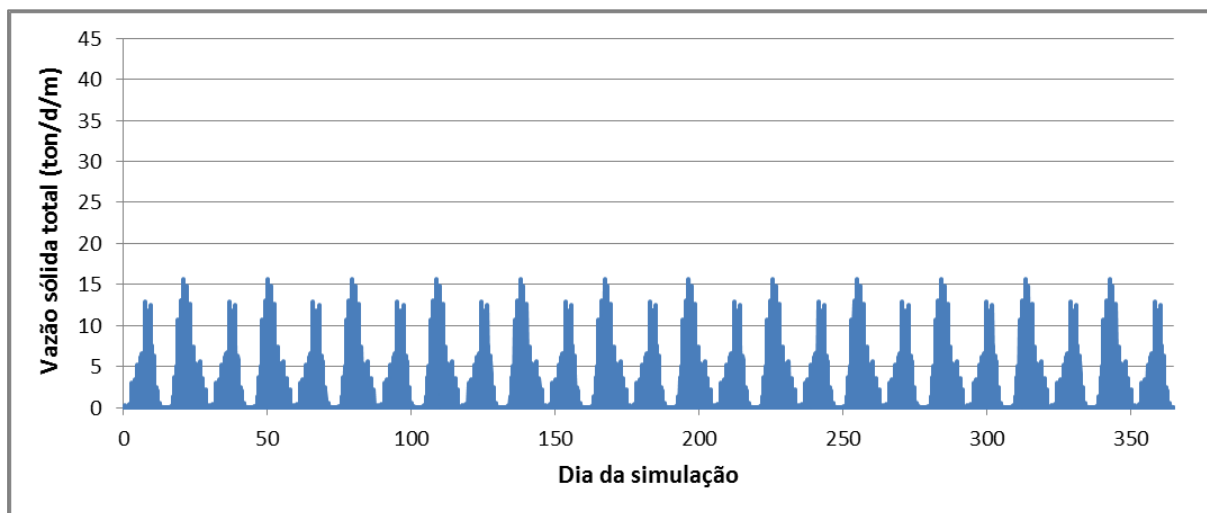
## 1.5.2 Resultados para os cenários Prog-T-Verão e Prog-T-Inverno

De maneira semelhante à análise de diagnóstico da evolução morfológica do fundo, para o Cenário Prog-T, a Figura 173 e a Figura 174 apresentam as séries temporais de vazão sólida total para os cenários de Verão e Inverno no ponto de referência. Importante lembrar que a diferença deste cenário em relação ao cenário de diagnóstico é o aprofundamento da área correspondente ao Píer T. Observa-se, para o ponto de referência, valores de vazão sólida total máxima da ordem de 15 ton/d/m, muito menores do que os obtidos para o cenário de diagnóstico (35 e 40 ton/d/m). Ao analisar essas séries em conjunto com as séries de tensão no fundo (Figura 62 e Figura 75) observa-se uma correspondência entre seus picos, ou seja, as maiores tensões no fundo correspondem às maiores vazões sólidas totais; da mesma forma, é possível correlacioná-las com as velocidades de corrente e com a elevação da superfície livre resultantes das simulações hidrodinâmicas: maiores níveis da superfície livre, bem como maiores velocidades de corrente correspondem, aproximadamente, aos períodos de maior tensão no fundo e conseqüentemente de maior vazão sólida.



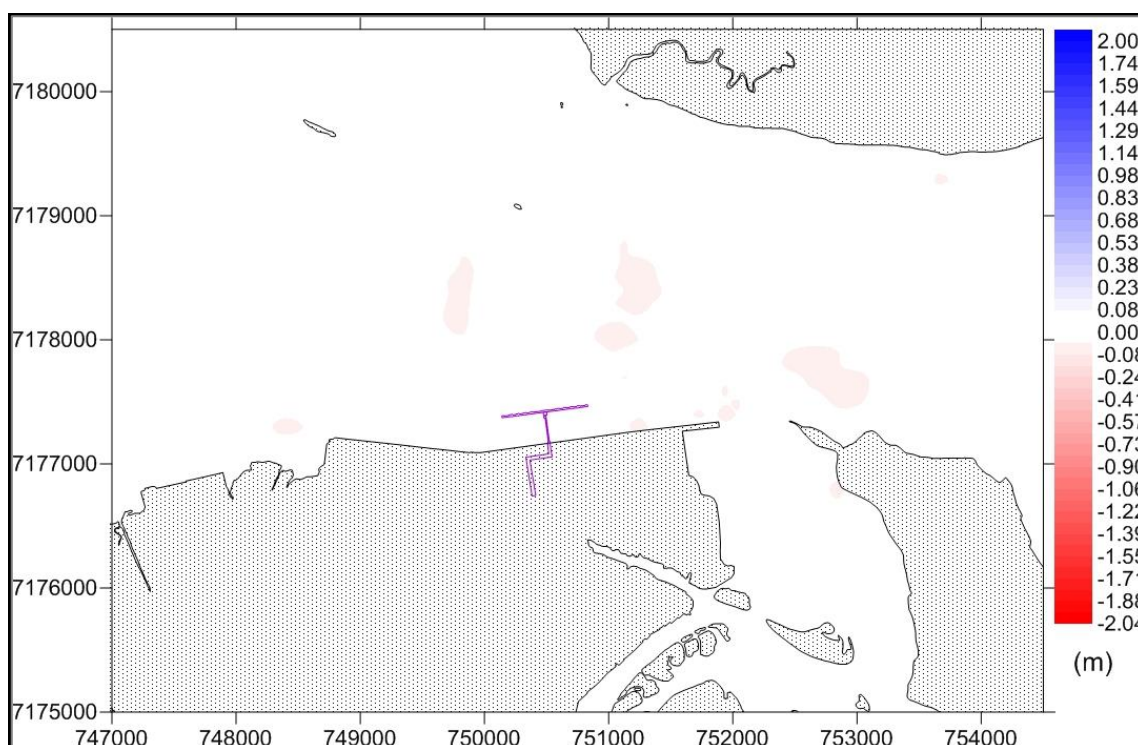
**Figura 173 - Vazão sólida total (ton/d/m) no ponto de interesse – Cenário Prog-T – Verão.**

		Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
		Nº PLANAVE	REV. PLANAVE	162
		RL-B00-H01-1001	0	

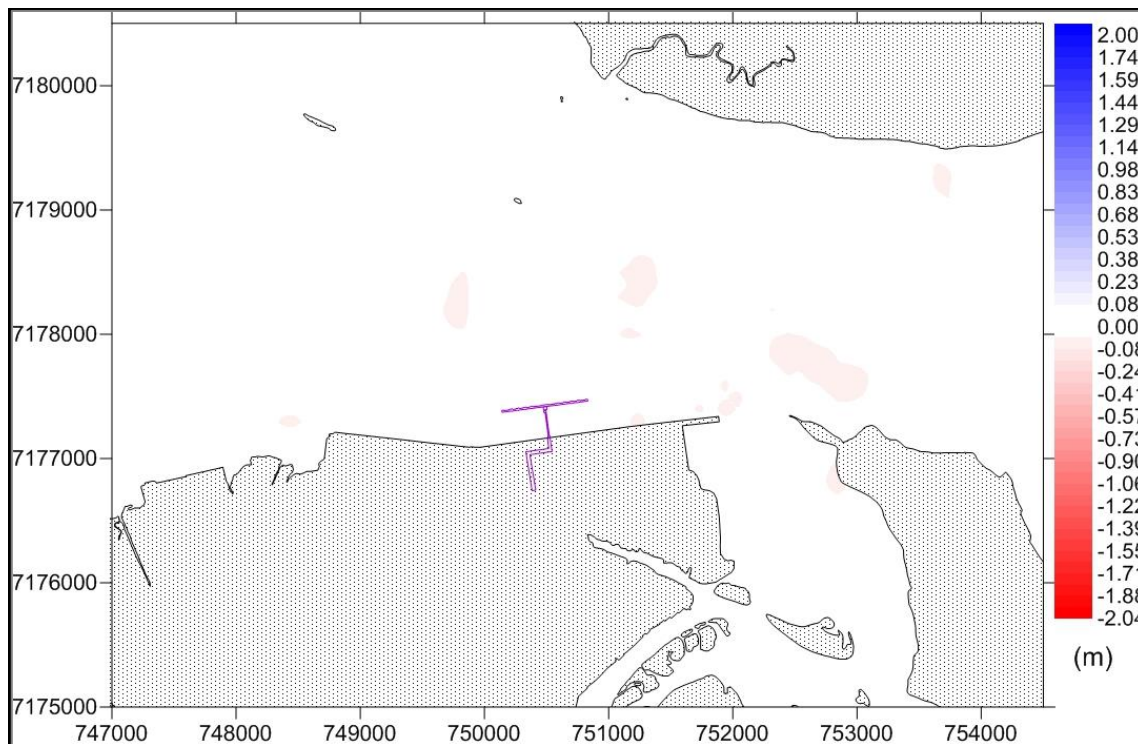


**Figura 174 - Vazão sólida total (ton/d/m) no ponto de interesse – Cenário Prog-T – Inverno.**

A Figura 175 e a Figura 176 apresentam as distribuições espaciais das variações de profundidade ( $\Delta H$ ), respectivamente para as situações de Verão e Inverno ao final da simulação. Valores positivos representam erosão (azul) e valores negativos representam deposição (vermelho). Em ambos os casos, as alterações do fundo são pequenas, não ultrapassando 0,25 m e ocorrem em pequenas porções de área. Isso pode ser explicado pelo fato de que na área do píer T há um aprofundamento e, além disso, as tensões no fundo são menores, nesse caso, são menores do que nos cenários de diagnóstico.



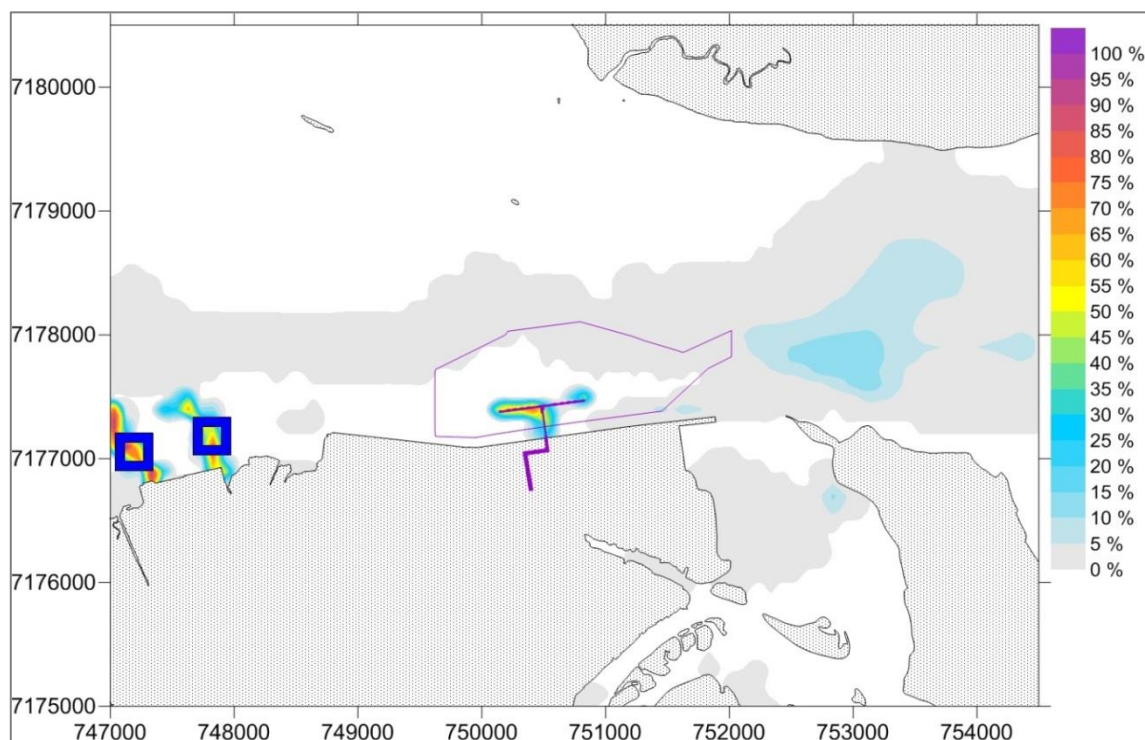
**Figura 175 - Isolinhas de variação de profundidade -  $\Delta H$  (m) – Cenário Prog-T – Verão.**



**Figura 176 - Isolinhas de variação de profundidade -  $\Delta H$  (m) – Cenário Prog-T – Inverno.**

Para identificar as áreas com mais tendência a sofrer alterações, na Figura 177 são apresentadas as probabilidades de ocorrência de tensão no fundo maior do que  $1,0 \text{ N/m}^2$ . Os quadrados azuis representam a localização de estruturas já existentes e consideradas nas simulações – de acordo com a seção 1.3.4 nas simulações as estruturas são representadas na forma de tensões, o que faz sua região de influência ficar em evidência num mapa de distribuição de tensões no fundo – o mesmo pode ser observado na área onde localiza-se o Píer T. Em comparação com o cenário de diagnóstico, na área de interesse, observam-se menores probabilidades de ocorrência de tensões maiores do que  $1,0 \text{ N/m}^2$ , o que explica a redução das áreas que podem sofrer alterações no fundo.

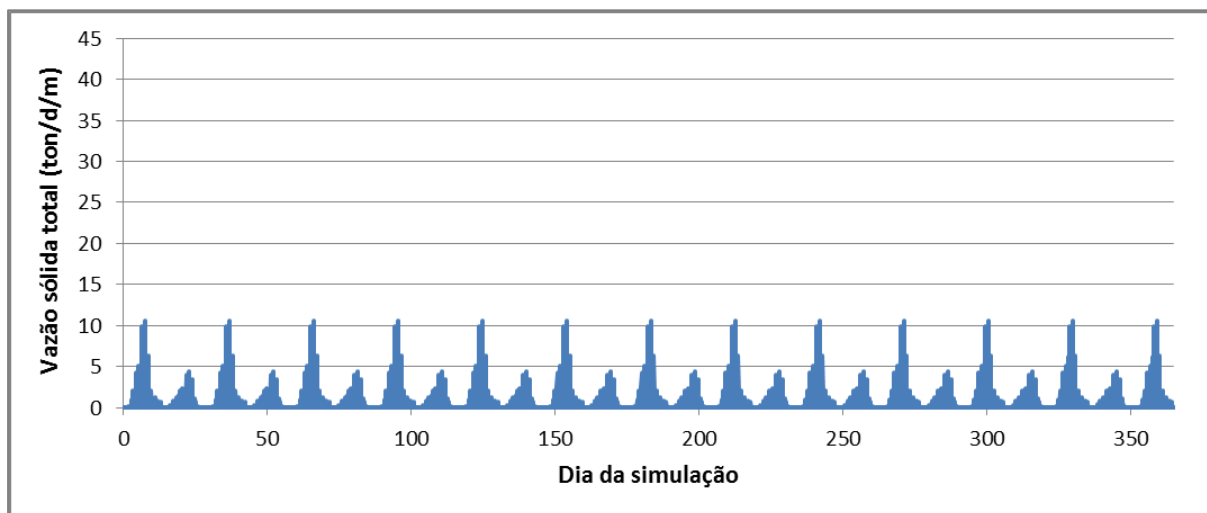




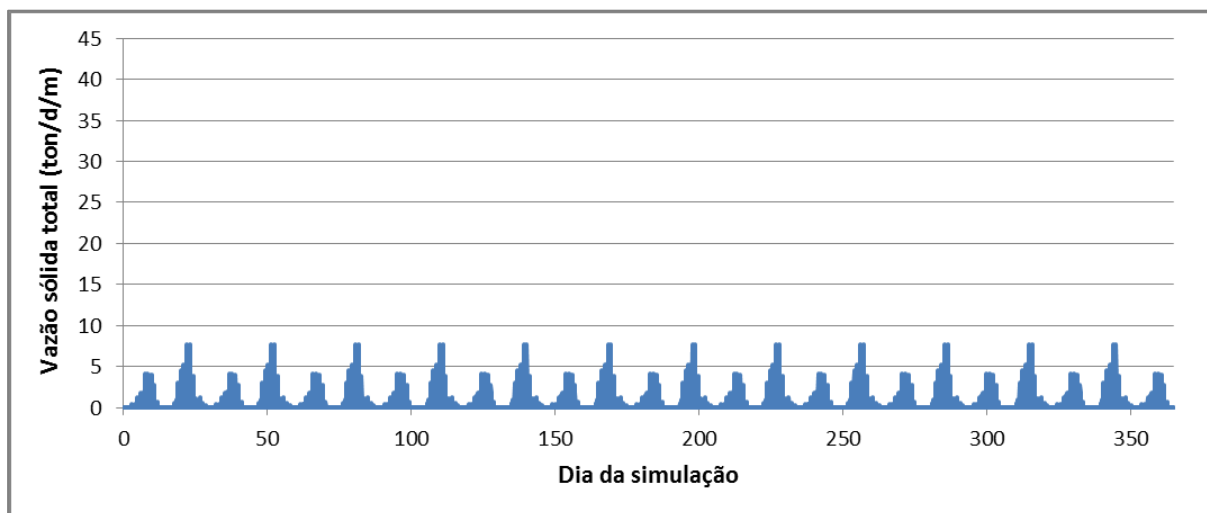
**Figura 177 – Probabilidades de que a tensão no fundo seja maior do que 1,0 N/m<sup>2</sup> – Cenário Prog-T. Quadrados azuis representam píeres existentes.**

### 1.5.3 Resultados para os cenários Prog-F-Verão e Prog-F-Inverno

Para o Cenário Prog-F, onde além do Píer T, também se considera a implantação do Píer F (e do aprofundamento da área relativa a ele), as séries temporais de vazão sólida total são apresentadas na Figura 178 e na Figura 179, respectivamente para os cenários de Verão e de Inverno (ambas para o ponto de referência). Observa-se, para o ponto de referência, valores de vazão sólida total máxima de no máximo 10 ton/d/m (Verão), permanecendo durante quase todo o tempo em amplitudes menores do que 5 ton/d/m – valores muito menores daqueles observados no cenário de diagnóstico e também no Cenário Prog-T. Novamente, numa análise conjunta com as séries de tensão no fundo (Figura 88 e Figura 101) observa-se uma correspondência entre os picos. Ainda, considerando essa relação, as menores vazões sólidas podem ser explicadas pela ocorrência de menores valores de tensão no fundo, que no ponto de referência não ultrapassam 0,8 N/m<sup>2</sup>.



**Figura 178 - Vazão sólida total (ton/d/m) no ponto de interesse – Cenário Prog-F – Verão.**



**Figura 179 - Vazão sólida total (ton/d/m) no ponto de interesse – Cenário Prog-F – Inverno.**

As variações espaciais de profundidade ( $\Delta H$ ), respectivamente para as situações de Verão e Inverno, são apresentadas na Figura 180 e na Figura 181. Valores positivos representam erosão (azul) e valores negativos representam deposição (vermelho). As áreas que sofrem alterações de fundo coincidem nos cenários de Verão e Inverno e tem as mesmas amplitudes.

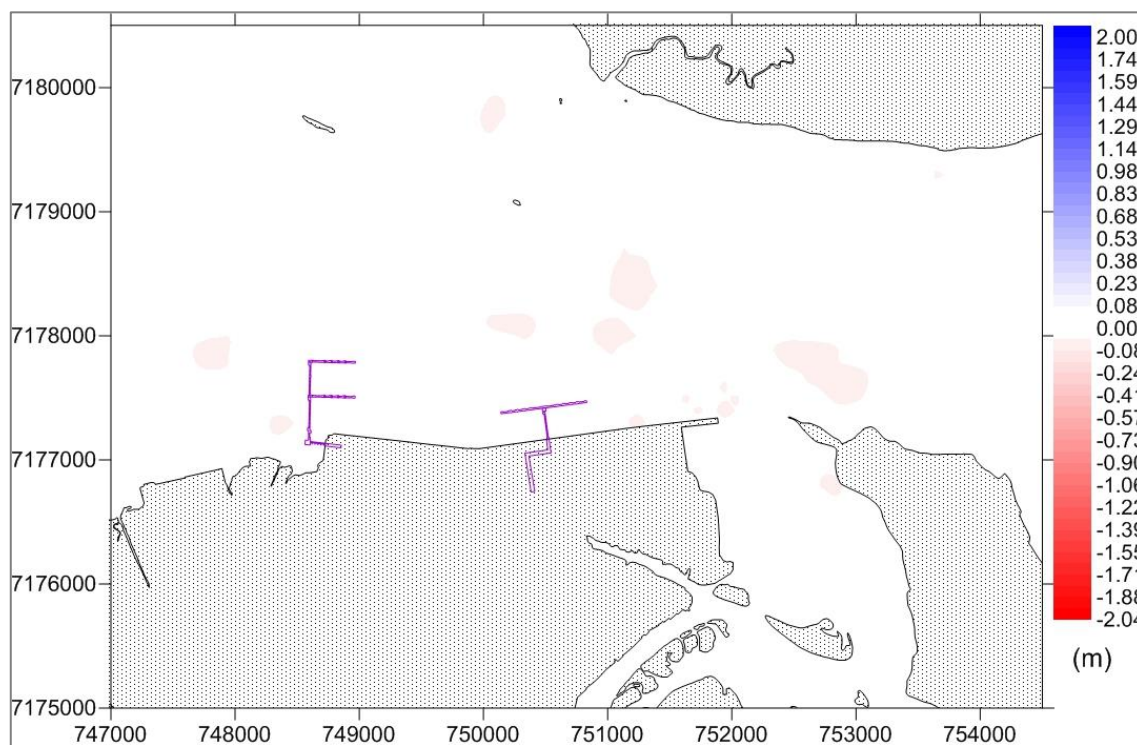


Figura 180 - Isolinhas de variação de profundidade -  $\Delta H$  (m) – Cenário Prog-F – Verão.

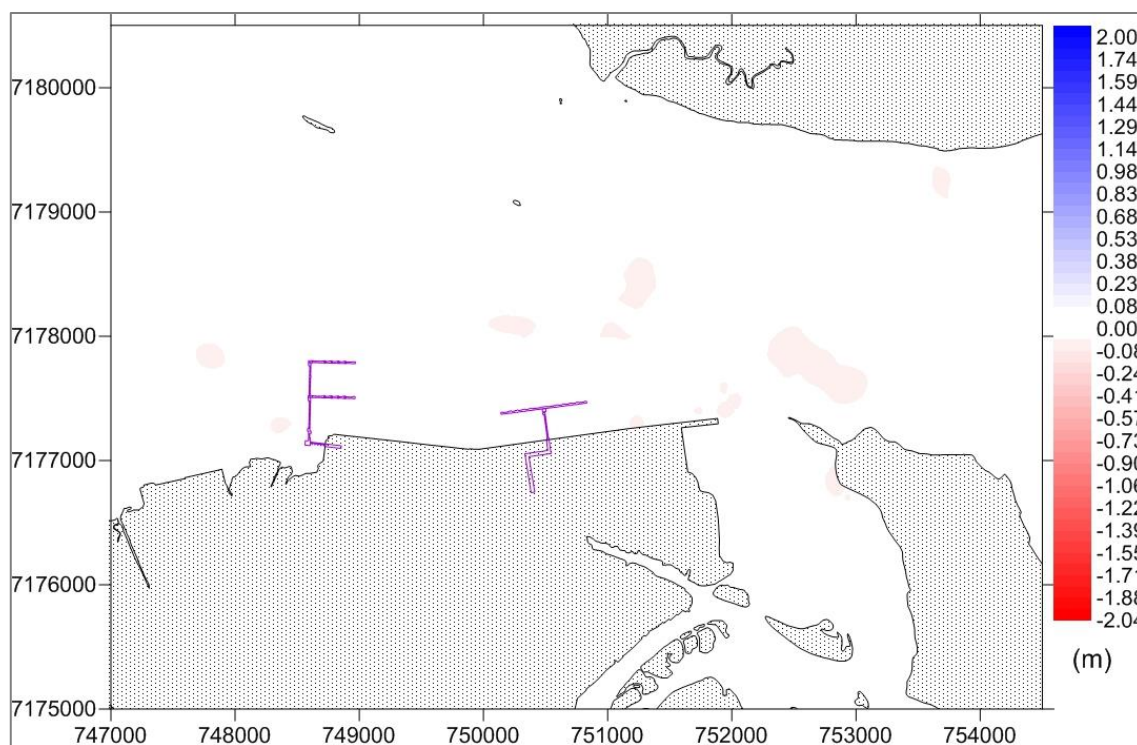




Figura 181 - Isolinhas de variação de profundidade -  $\Delta H$  (m) – Cenário Prog-F – Inverno.

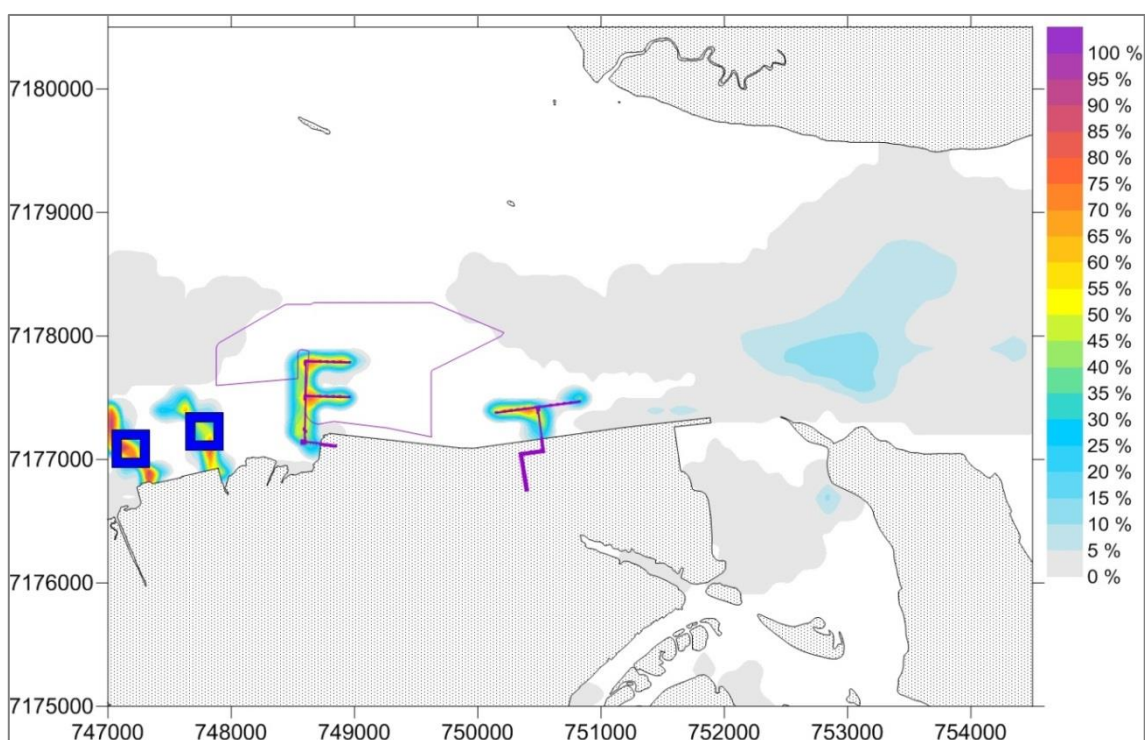
Na Figura 182 são apresentadas as probabilidades de ocorrência de tensão no fundo maior do que  $1,0 \text{ N/m}^2$  para o Cenário Prog-F. Em comparação com os cenários anteriores,



		Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
		Nº PLANAVE	REV. PLANAVE	167
		RL-B00-H01-1001	0	

observam-se menores probabilidades de ocorrência de tensão no fundo maior do que  $1,0 \text{ N/m}^2$ , e essa redução ocorre, principalmente, nas regiões onde se considera o aprofundamento em função da implantação das estruturas (até agora, píeres T e F). Assim como nos cenários anteriores, na área analisada, as maiores probabilidades são da ordem de 15% e são observadas próximo à saída/entrada do Canal da Cotonga.

Cabe observar que o valor de  $1,0 \text{ N/m}^2$  é apenas uma referência para identificação de áreas mais (ou menos) propícias a ocorrência de erosão; processos de deposição e erosão em um ambiente estuarino, sujeitos a variações de maré, são muito dinâmicos. A tensão no fundo é um parâmetro importante a ser analisado, porém não é o único a influenciar essa dinâmica.

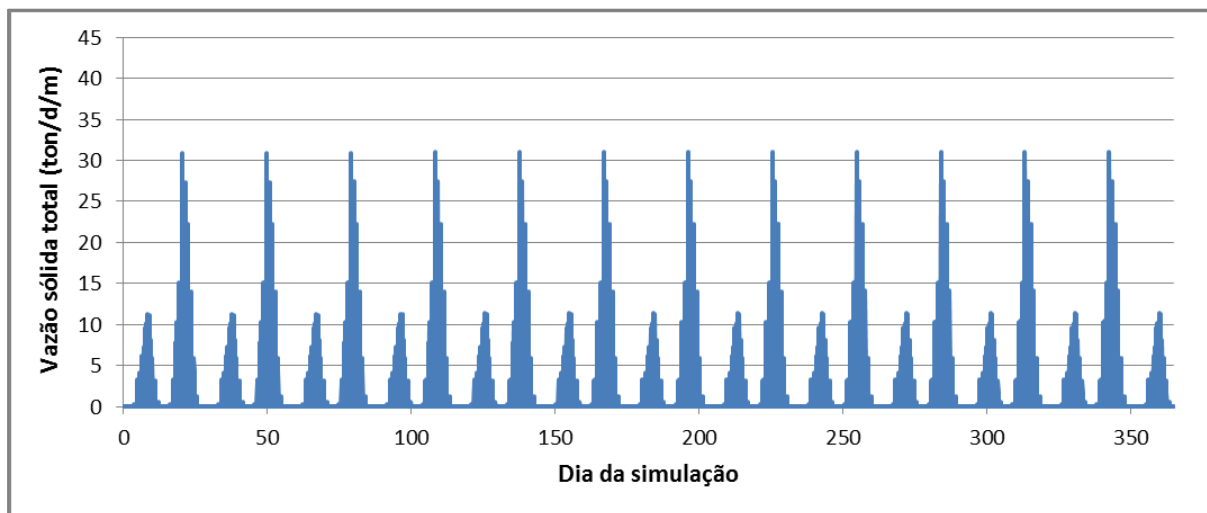


**Figura 182 – Probabilidades de que a tensão no fundo seja maior do que  $1,0 \text{ N/m}^2$  – Cenário Prog-F. Quadrados azuis representam píeres existentes.**

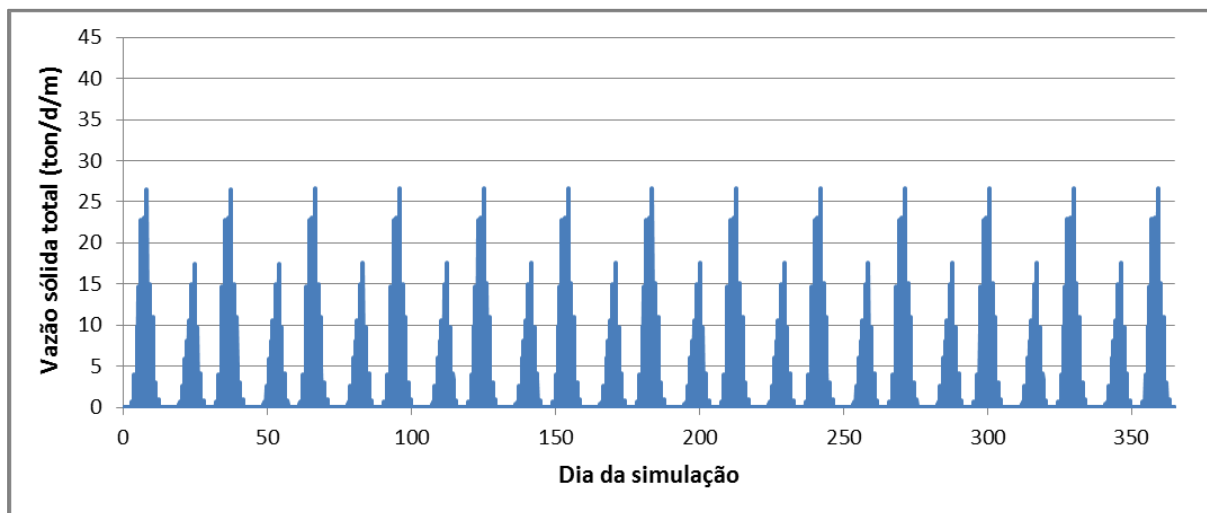
#### 1.5.4 Resultados para os cenários Prog-CN-Verão e Prog-CN-Inverno

Para o Cenário Prog-CN, que considera a implantação de um Complexo Náutico composto por uma marina e um terminal de passageiros e o aprofundamento da área referente a essas estruturas, as séries temporais de vazão sólida total são apresentadas na Figura 183 e na Figura 184 (respectivamente para Verão e Inverno). Em ambos os cenários observam-se picos da ordem de 30 e de 25  $\text{ton/d/m}$  (no ponto de referência), prevalecendo valores da ordem de 10  $\text{ton/d/m}$  – maiores daqueles observados nos cenários Prog-F. A análise da série

de tensões no fundo (Figura 114 e Figura 127) também apresenta picos maiores do que 1,0 N/m<sup>2</sup> quando comparadas aos cenários Prog-F, conseqüentemente é de se esperar maiores vazões sólidas no ponto de referência.

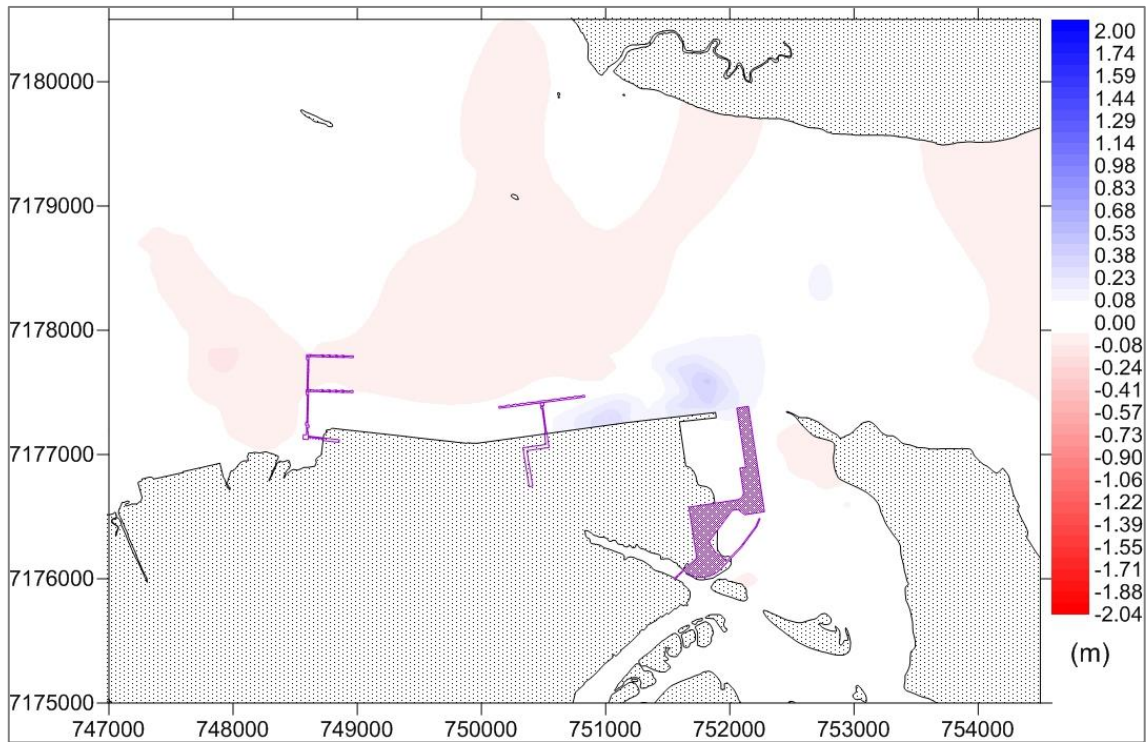


**Figura 183 - Vazão sólida total (ton/d/m) no ponto de interesse – Cenário Prog-CN – Verão.**

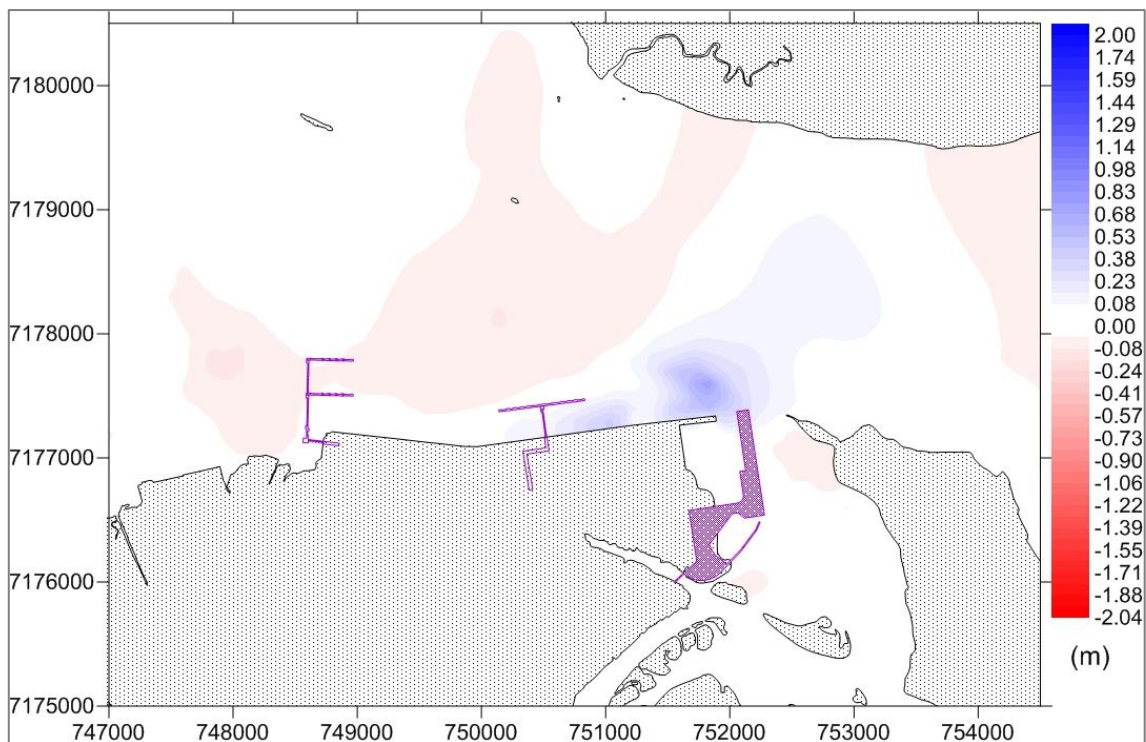


**Figura 184 - Vazão sólida total (ton/d/m) no ponto de interesse – Cenário Prog-CN – Inverno.**

Para as situações de Verão e Inverno, a Figura 185 e a Figura 186 apresentam as variações espaciais de profundidade ( $\Delta H$ ) ao final do período de simulação, e são semelhantes nos dois cenários. Valores positivos representam erosão (azul) e valores negativos representam deposição (vermelho). Em comparação com os outros cenários, observa-se alterações mais significativas na saída do Canal da Cotinga – nesta área, de acordo com as simulações, deve ocorrer erosão da ordem de 0,3 m.





**Figura 185 - Isolinhas de variação de profundidade -  $\Delta H$  (m) – Cenário Prog-CN – Verão.**

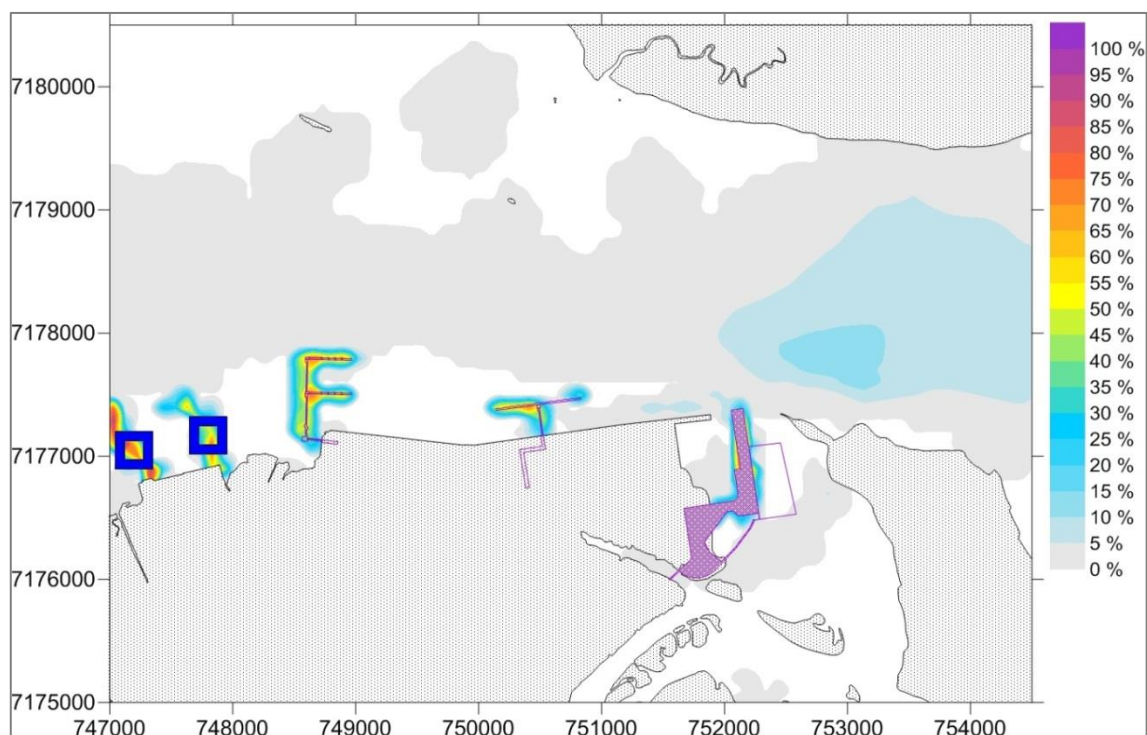


**Figura 186 - Isolinhas de variação de profundidade -  $\Delta H$  (m) – Cenário Prog-CN – Inverno.**



		Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:  170
		Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	

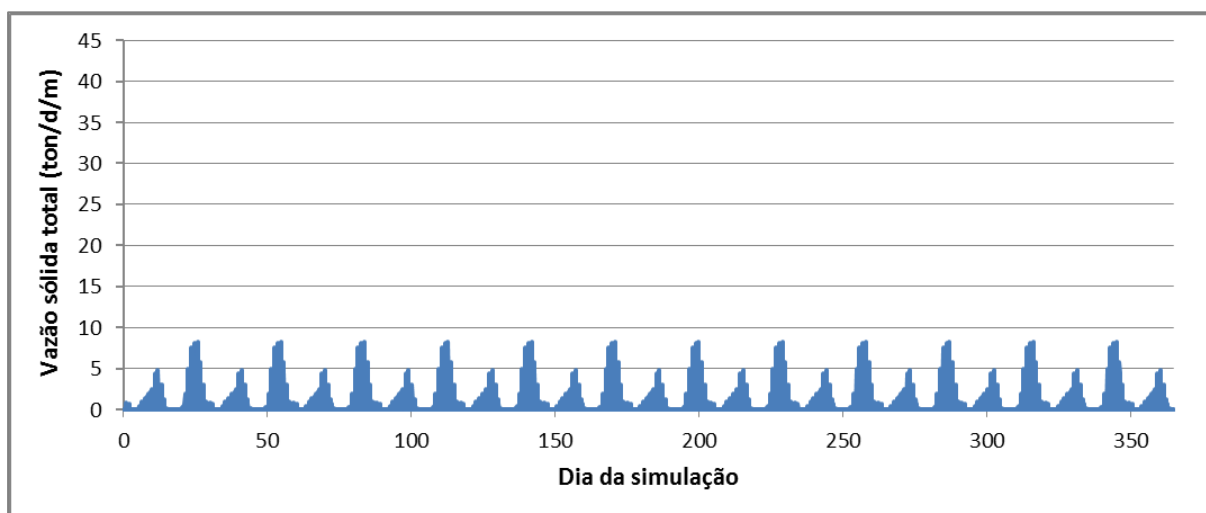
Na Figura 187 são apresentadas as probabilidades de ocorrência de tensão no fundo maior do que  $1,0 \text{ N/m}^2$  para o Cenário Prog-CN. Na região do Complexo Náutico é possível perceber que a área onde podem ocorrer tensões acima do limite estabelecido como referência ( $1,0 \text{ N/m}^2$ ) é menor quando comparada aos cenários anteriores - isso acontece na região onde se considera aprofundamento (dragagem do fundo).



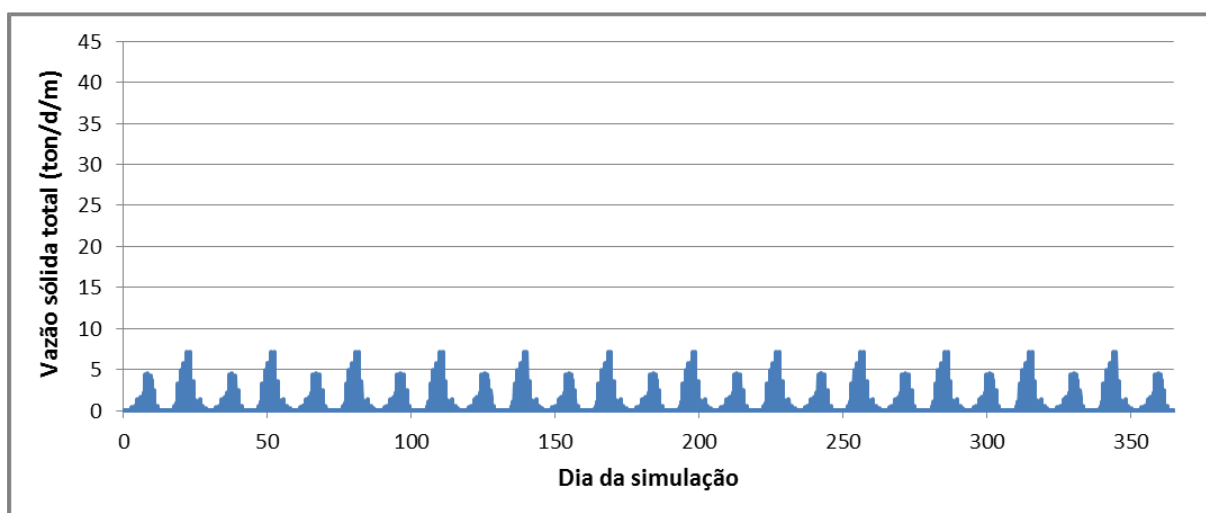
**Figura 187 – Probabilidades de que a tensão no fundo seja maior do que  $1,0 \text{ N/m}^2$  – Cenário Prog-CN. Quadrados azuis representam piers existentes.**

### 1.5.5 Resultados para os cenários Prog-L-Verão e Prog-L-Inverno

Para o Cenário Prog-L, as séries temporais de vazão sólida total são apresentadas na Figura 188 e na Figura 189, respectivamente para os cenários de Verão e de Inverno. Em ambos, no ponto de referência, as vazões sólidas totais máximas não ultrapassam  $8 \text{ ton/d/m}$ , permanecendo durante quase todo o tempo em amplitudes menores do que  $5 \text{ ton/d/m}$  – valores semelhantes aos observados nos cenários Prog-F. Da mesma forma, as séries de tensão no fundo (Figura 140 e Figura 153) mostram valores máximos da ordem de  $0,8 \text{ N/m}^2$ , indicando novamente a correspondência entre menores vazões sólidas totais e menores tensões no fundo.



**Figura 188 - Vazão sólida total (ton/d/m) no ponto de interesse – Cenário Prog-L – Verão.**



**Figura 189 - Vazão sólida total (ton/d/m) no ponto de interesse – Cenário Prog-L – Inverno.**

Para as situações de Verão e Inverno, as variações espaciais de profundidade ( $\Delta H$ ) são apresentadas na Figura 190 e na Figura 191 – ambos os resultados são para o período final da simulação. Importante destacar que, no local onde deverá ser construído o Píer, atualmente existe uma estrutura (considerada nas simulações anteriores). No processo de ampliação essa estrutura deverá ser alterada e área do seu entorno passará por aprofundamento (dragagem). Assim, comparando essa área com os cenários anteriores, observa-se uma redução na deposição, tanto na situação de Verão quanto na situação de Inverno.

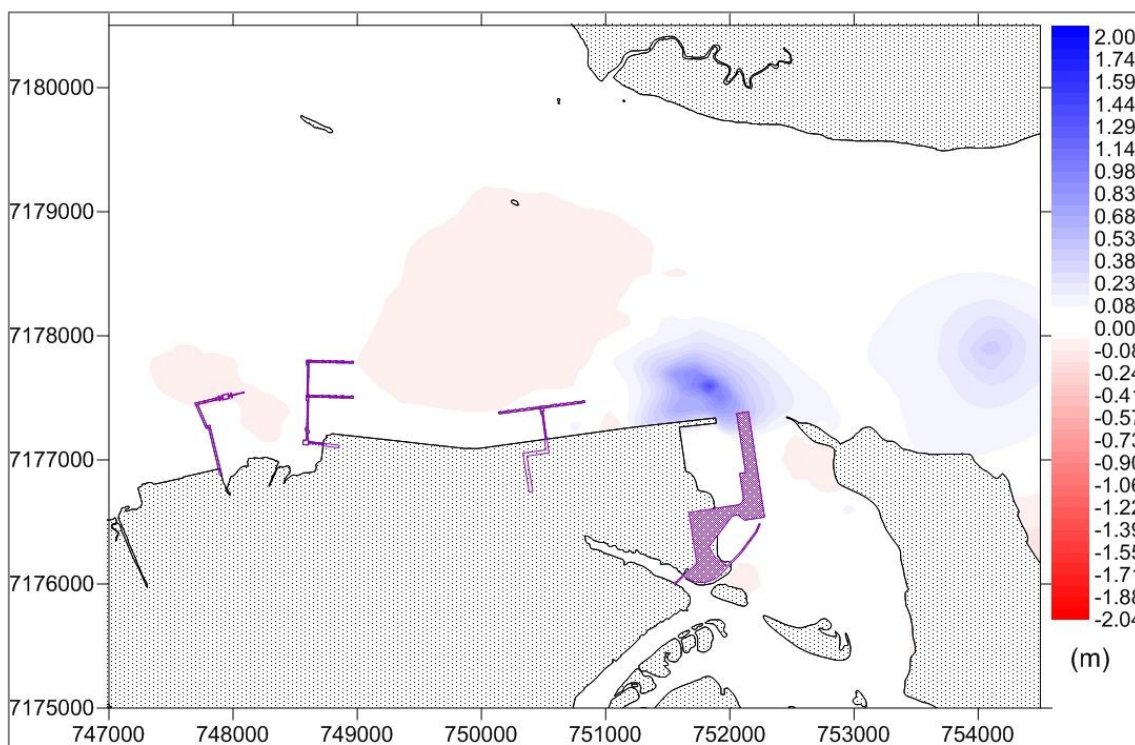


Figura 190 - Isolinas de variação de profundidade -  $\Delta H$  (m) – Cenário Prog-L – Verão.

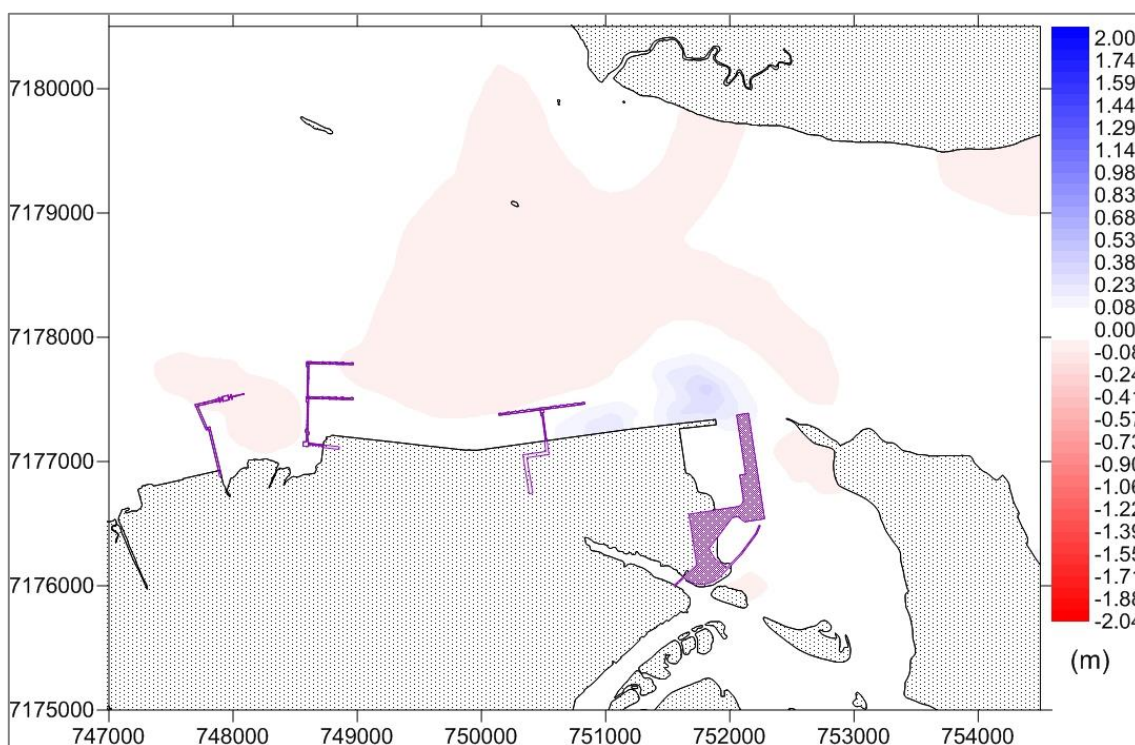




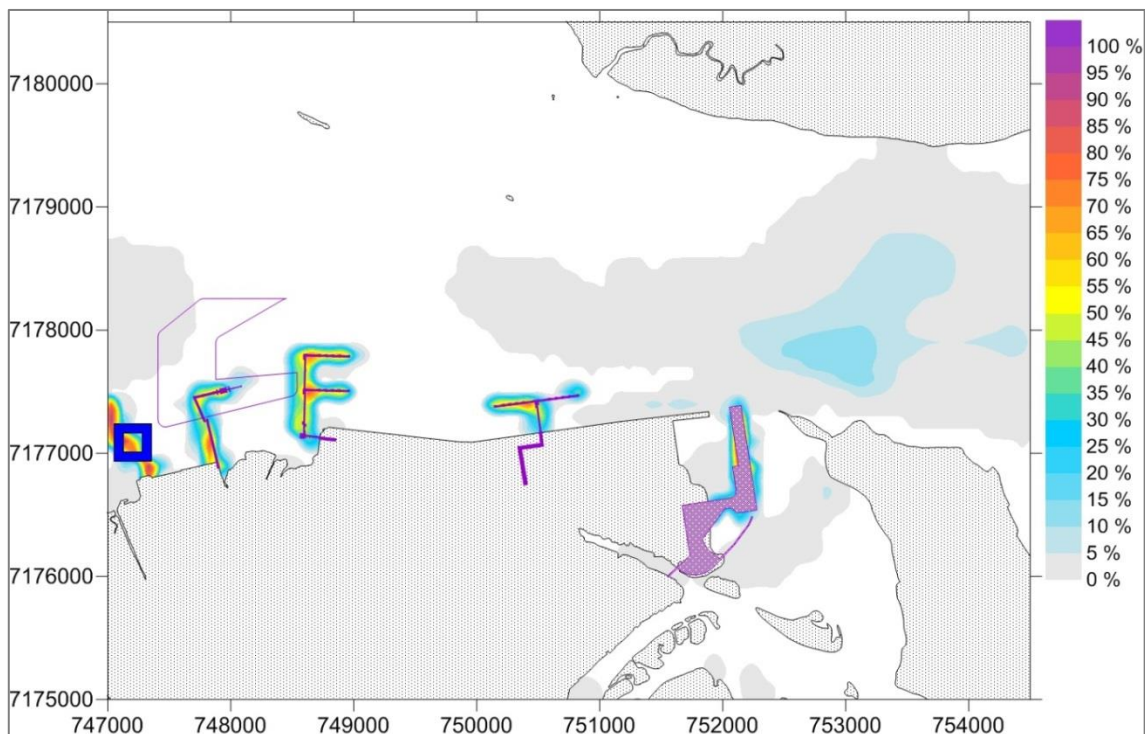
Figura 191 - Isolinas de variação de profundidade -  $\Delta H$  (m) – Cenário Prog-L – Inverno.

Seguindo as análises anteriores, as probabilidades de ocorrência de tensão no fundo maior do que  $1,0 \text{ N/m}^2$  são apresentadas na Figura 192. Em comparação com os cenários



 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	173

anteriores, observam-se menores probabilidades de ocorrência tensão no fundo maior do que  $1,0 \text{ N/m}^2$ . Essa redução tende a ocorrer nas áreas cuja profundidade é alterada em função da implantação das estruturas de ampliação. Como nos cenários anteriores, as maiores probabilidades, com exceção das áreas próximas às estruturas, diretamente influenciadas por elas, são da ordem de 15% na área próxima à saída/entrada do Canal da Cotinga.

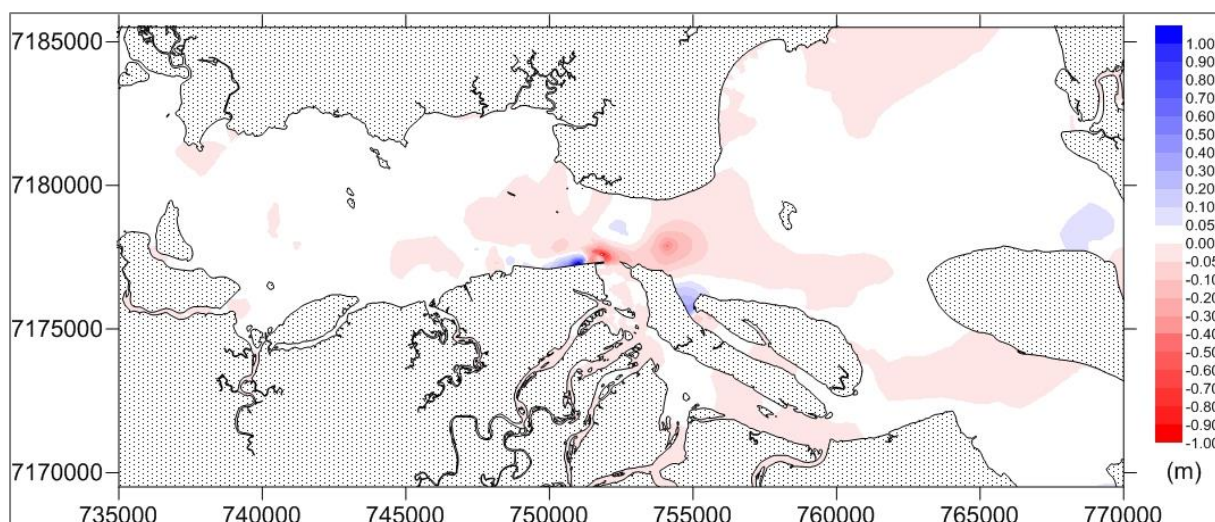


**Figura 192 – Probabilidades de que a tensão no fundo seja maior do que  $1,0 \text{ N/m}^2$  – Cenário Prog-L. Quadrados azuis representam píeres existentes.**

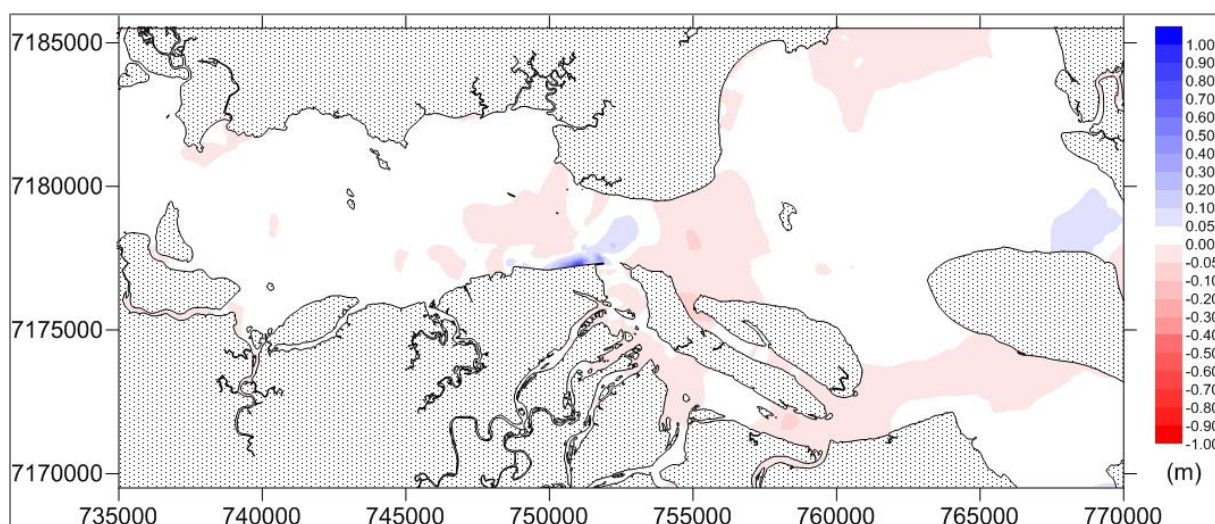
### 1.5.6 Mudanças de transporte de sedimento no fundo da baía

Considerando os resultados obtidos a partir das simulações da evolução morfológica do fundo para os cenários Diag-Verão, Diag-Inverno, Prog-L – Verão e Prog-L – Inverno, foram calculadas as diferenças de profundidades entre os cenários atuais e futuros, ou seja, os valores de  $\Delta H$  dos cenários Prog-L foram subtraídos dos valores de  $\Delta H$  dos cenários Diag. Assim, resultados positivos representam redução da variação de profundidade (ou do transporte de sedimento do fundo), enquanto resultados negativos representam aumento da variação de profundidade, ou seja, aumento do transporte de sedimento do fundo. Esse resultado dá um noção geral dos impactos da implantação dos empreendimentos – píeres T, F, L e Complexo Náutico sobre o transporte de sedimentos e evolução morfológica do fundo da baía. As diferenças entre os cenários foram calculadas a partir dos resultados para o tempo final de simulação de cada um dos cenários (resultados apresentados nas seções 1.5.1 e

1.5.5); as diferenças resultantes são apresentadas na Figura 193 e na Figura 194. Em ambas as figuras observa-se que as maiores variações ocorrem próximo à saída do Canal da Continga e são da ordem de até 1,0 m de profundidade; além disso diferem um pouco nas situações de Inverno e de Verão. Isso pode ser explicado em função das diferenças das velocidades e direções de corrente, elevação da maré, e respectivas tensões no fundo. Nas áreas mais próximas ao Complexo Náutico e aos píeres T, F e L, no entanto, as alterações de fundo possuem ordens de grandeza semelhantes.





**Figura 193 – Diferença entre as variações de profundidade -  $\Delta H$  (m) – dos cenários Diag-Verão e Prog-L – Verão.**



**Figura 194 – Diferença entre as variações de profundidade -  $\Delta H$  (m) – dos cenários Diag-Inverno e Prog-L – Inverno.**

## 1.6 Resultados de Modelo de Geração de Ondas

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	175

As simulações de ondas foram geradas utilizando o módulo de Geração de Ondas do SisBaHiA descrito na seção 1.2.3. Este módulo, basicamente, simula ondas geradas pelo vento; como objetivo desta seção está a análise das possíveis alterações do regime de ondas em função das mudanças morfológicas necessárias para a implantação dos empreendimentos relacionadas à ampliação do Porto de Paranaguá. Nesse sentido, foram simulados os 4 cenários – diagnóstico e prognóstico, combinados com Verão e Inverno – definidos na seção 1.3.5 como:

- Diag-Verão;
- Diag-Inverno;
- Prog-Verão; e
- Prog-Inverno.

Para simular os campos de ondas geradas pelo vento no interior Baía de Paranaguá, foram utilizadas as séries temporais de intensidade e direção do vento para Inverno e Verão conforme descrição apresentadas na seção 1.3.5. A análise dessas duas séries mostrou que a velocidade média do vento é da ordem de 3,0 m/s, com picos de curta duração de intensidade máxima de cerca de 11,5 m/s (considerando os dois períodos considerados). Ainda, de acordo com as séries temporais de intensidade do vento há uma predominância de ventos com velocidades entre 1,0 e 2,0 m/s, que sopram de sudeste para noroeste.

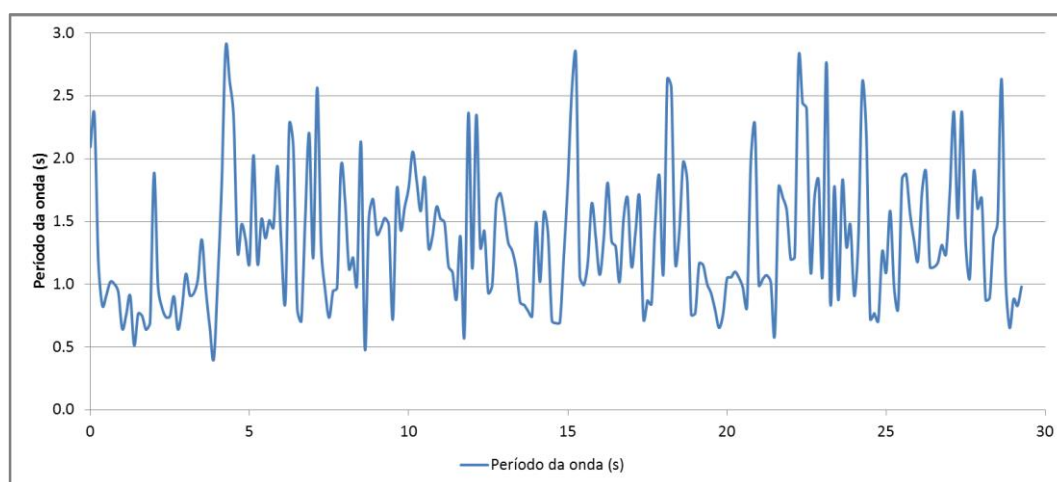
Picos intensos de curta duração possuem forte impacto nas características das ondas, produzindo ondas de baixa amplitude e curto período. Esse fato tem sido observado em vários trabalhos sobre estudos de geração de ondas por forçantes locais. O ambiente abrigado dos estuários, proporcionado pelas barreiras naturais existentes, impedem a entrada de ondas de grande amplitude, superiores a 4,0 m e períodos mais longos, superiores a 10,0 s. Essas ondas de maior amplitude e período são, na grande maioria dos casos, formadas em regiões remotas do alto mar, quando da passagem de tempestades intensas e furacões. Estas se deslocam de regiões remotas até a costa, porém são impedidas de penetrar no interior dos estuários devido às barreiras formadas por ilhas e também pelo ângulo de incidência em relação aos canais que levam para o interior das baías. Para o caso específico da Baía de Paranaguá, resultados de trabalhos de modelagem de ondas mostraram que ondas remotas não se propagam para o interior da Baía de Paranaguá. Além disso, o modelo de geração de ondas locais, ou seja, o modelo forçado com campo de vento local, mostra que as ondas geradas pelo vento são de pequena amplitude, menores de 1,0 m, e com períodos da ordem de 3,0 s.



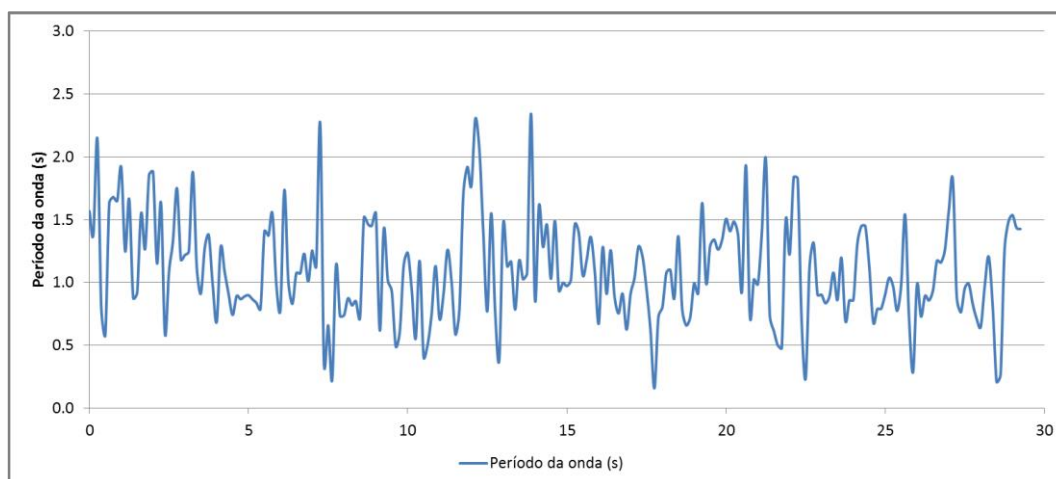
Nesse contexto, foram analisadas, para cada um dos 4 cenários considerados, duas situações: uma de frente fria, com intensidade do vento da ordem de 10,0 m/s, vindos de Sul e outra considerando ocorrência de ventos predominantes, ou seja, situações em que a velocidade do vento esteja entre 1,0 e 2,0 m/s, vindos de sudeste. São apresentados resultados temporais (para o ponto de referência da ???) para o período das ondas e para a altura significativa. Para períodos de frente fria e para ventos predominantes, são apresentadas distribuições espaciais para o período de ondas, altura significativa e tensão no fundo, e velocidade orbital.

### 1.6.1 Resultados para os Cenários Diag-Verão e Diag Inverno

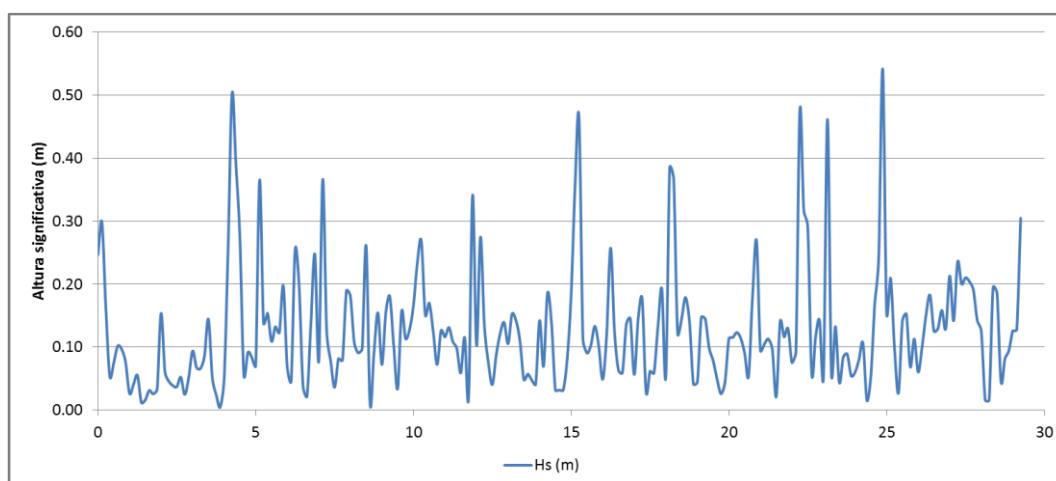
A Figura 195 e Figura 196 apresentam as séries temporais de período das ondas para os cenários Diag-Verão e Diag-Inverno respectivamente. Observa-se ondas com máximos períodos entre 2,5 e 3,0 s, ou seja, ondas características de forçantes locais, com pequeno comprimento de onda ( $1,0 \text{ m} < L < 10,0 \text{ m}$ ) e com baixa energia. As alturas significativas associadas a essas ondas são representadas pelas séries temporais apresentadas na Figura 197 e na Figura 198, onde se observa ondas de pequena amplitude, com máximas variando entre 50,0 e 55,0 cm no período de verão e entre 30,0 e 40,0 cm para o período de inverno.



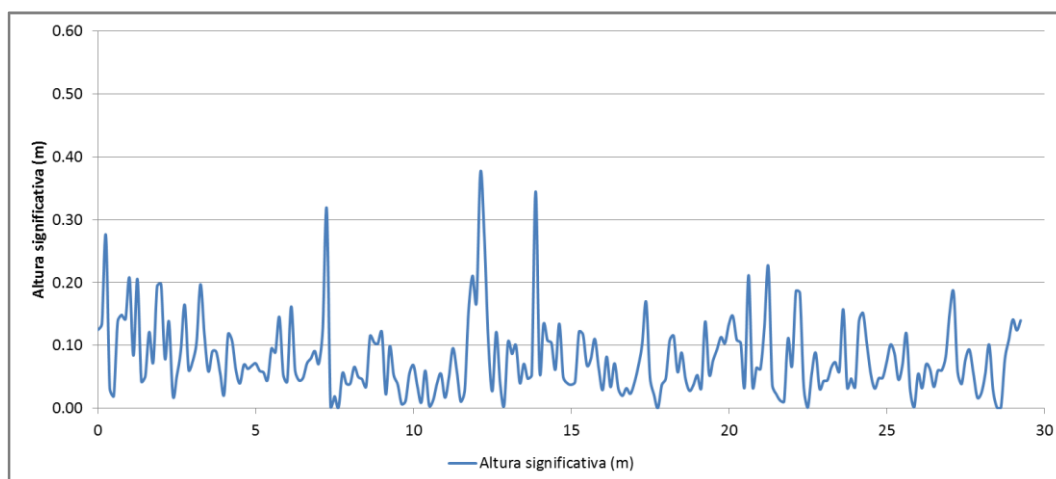
**Figura 195 - Série temporal do período de onda – Cenário Diag-Verão.**



**Figura 196 - Série temporal do período de onda – Cenário Diag-Inverno.**



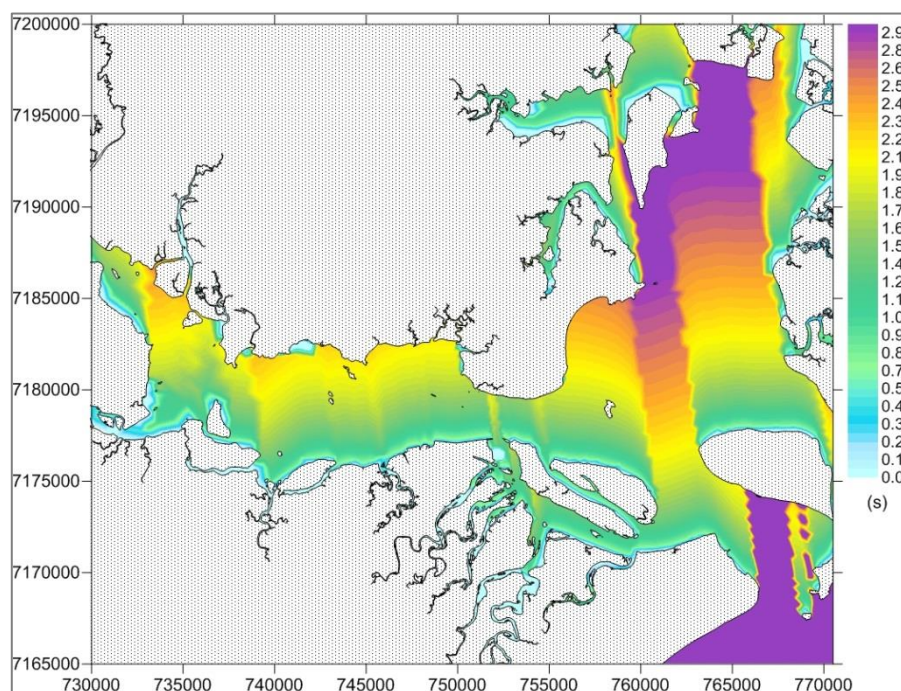
**Figura 197 - Série temporal da altura significativa – Cenário Diag-Verão.**



**Figura 198 - Série temporal da altura significativa – Cenário Diag-Inverno.**

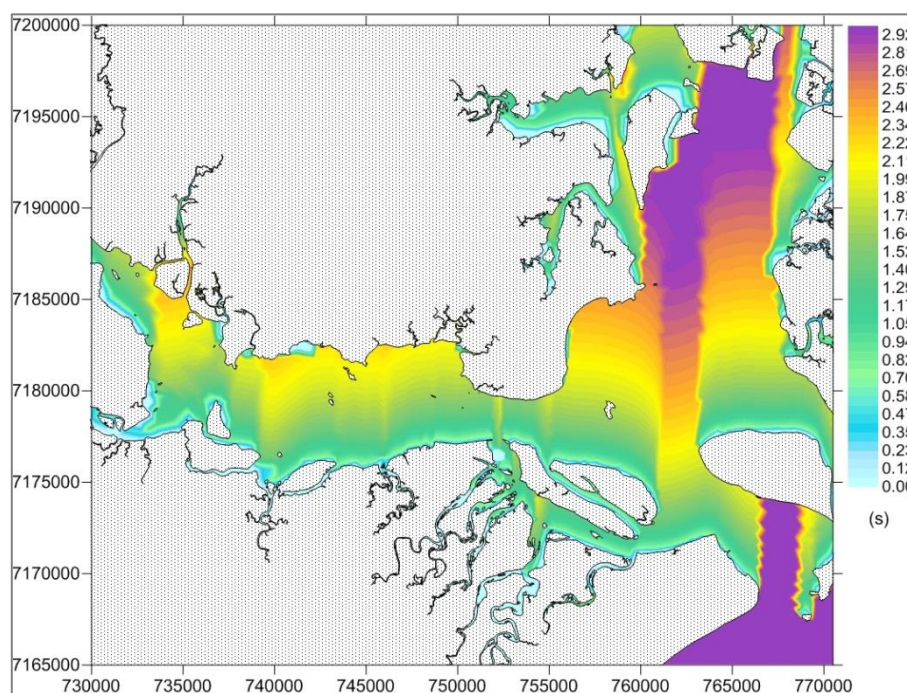
A distribuição espacial do período de ondas é apresentada na Figura 199 e na Figura 200. Esses resultados foram obtidos com forçantes meteorológicas com características de sistema

frontal (frente fria). Como é possível observar, houve a geração de ondas de curto período, com máximos valores da ordem de 2,92 s que se concentraram na região da Baía das Laranjeiras, porção norte do domínio. Os ventos de sul, com intensidade de da ordem de 10 m/s, característicos da passagem de frentes frias na região, provocam as maiores perturbações no eixo Norte-Sul do estuário, devido à maior pista para desenvolvimento das ondulações. Para o período de inverno, a frente fria apresentou características semelhantes ao sistema frontal de verão, assim os resultados obtidos, com relação aos maiores períodos das ondas geradas e a região de ocorrência (Figura 200), foram muito semelhantes às simulações do período de verão. Ou seja, os maiores períodos gerados foram inferiores a 3,0 s, e se concentraram na porção norte da Baía das Laranjeiras, região afastada da área de interesse desse estudo.



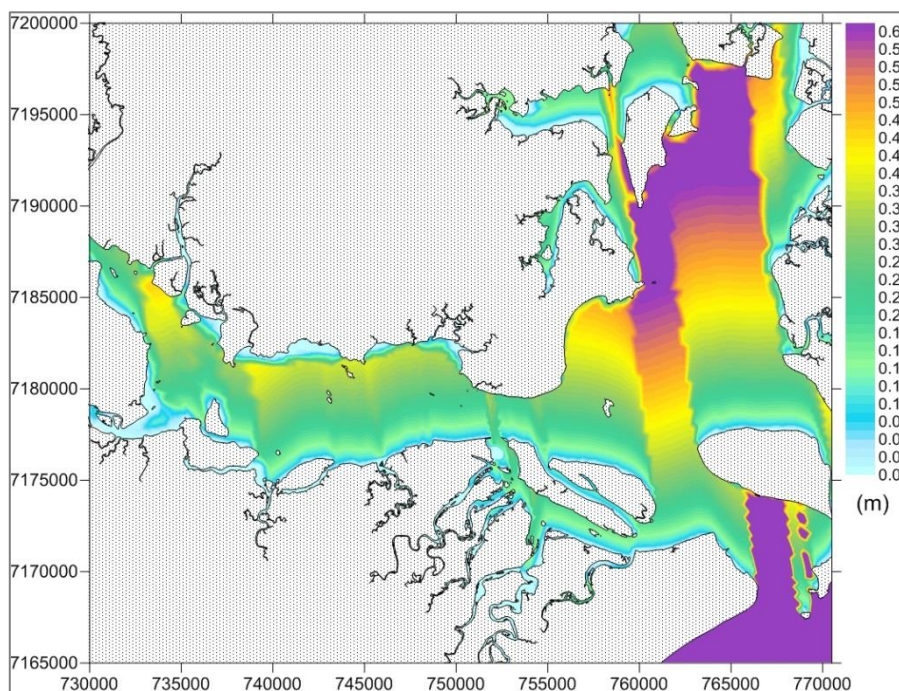
**Figura 199 - Distribuição espacial do período das ondas durante uma ocorrência de frente fria – Cenário Diag-Verão.**





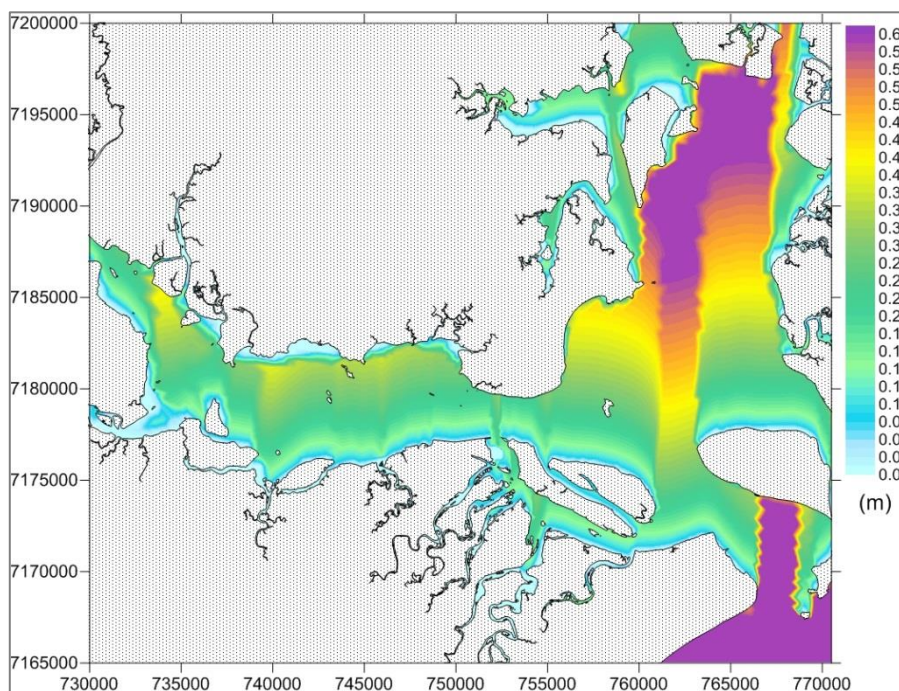
**Figura 200 - Distribuição espacial do período das ondas durante uma ocorrência de frente fria – Cenário Diag-Inverno**

Como era de se esperar, as ondas geradas localmente possuem baixa amplitude, sendo inferiores a 1,0 m. Mesmo durante a ocorrência de sistemas frontais, quando se observam amplificações na intensidade do campo de vento, atingindo valores da ordem de 10,0 m/s, as ondas geradas não apresentam amplitudes significativas. Isso ocorre justamente devido ao curto intervalo de tempo que os ventos permanecem com intensidades significativas e ao espaço físico (pista de onda) disponível para as ondas se desenvolverem. A partir da Figura 201 é possível observar que, para uma situação de vento Sul (sistema frontal), a porção do estuário com alinhamento Norte- Sul é a área com maior espaço para que ocorra o desenvolvimento de ondas geradas por forçantes locais. Com isso, a área de interesse, localizada no eixo Leste – Oeste do CEP, se encontra protegida em relação aos ventos gerados pela passagem de frentes frias.



**Figura 201 - Distribuição espacial da altura significativa das ondas durante uma ocorrência de frente fria - Cenário Diag-Verão.**

Uma vez que o cenário de sistema frontal de inverno se assemelha ao sistema frontal observado no verão, os campos de ondas gerados nesses dois cenários são também semelhantes. A Figura 202 mostra o campo de altura significativa das ondas geradas em situações de frente fria de inverno. Observa-se a grande semelhança com os resultados obtidos anteriormente. Ou seja, alturas significativas máximas inferiores a 1,0 m, localizadas no eixo Norte-Sul do baía. Na área de interesse, o modelo mostra ondas com altura significativa da ordem de 10,0 cm, na condição de vento sul. Isso ocorre porque com esse ângulo de incidência, o espaço para que a onda se desenvolva é bastante reduzido.



**Figura 202 - Distribuição espacial da altura significativa das ondas durante uma ocorrência de frente fria - Cenário Diag-Inverno.**

Uma análise importante é a forma de identificar a capacidade das ondas em gerar perturbações no sedimento de fundo, a qual pode ser realizada através da análise da tensão de cisalhamento gerada pela energia das ondas. A ideia geral se concentra na comparação entre a tensão de cisalhamento gerado pelas ondas e a tensão crítica de cisalhamento, que é a tensão a partir da qual ocorrerá mobilização do sedimento. Se a tensão gerada pelas ondas superar a tensão crítica, ocorrerá a perturbação do sedimento de fundo e seu transporte pelas correntes locais. A tensão crítica de cisalhamento é diretamente proporcional ao diâmetro do grão de sedimento e da razão entre a densidade da água e a densidade do sedimento, e pode ser representada por  $t_c = q^* (s - 1) r g D_{50}$ , onde  $t_c$  é a tensão crítica de cisalhamento de fundo, em  $N/m^2$ ,  $q^*$  é um parâmetro adimensional, conhecido como parâmetro Shields,  $s$  é a gravidade específica da particular de sedimento,  $r$  é a densidade da água,  $g$  é a aceleração da gravidade, e  $D_{50}$  é o diâmetro médio da partícula, em m. A Tabela 17 apresenta a tensão crítica de cisalhamento em função das características dos sedimentos de fundo.



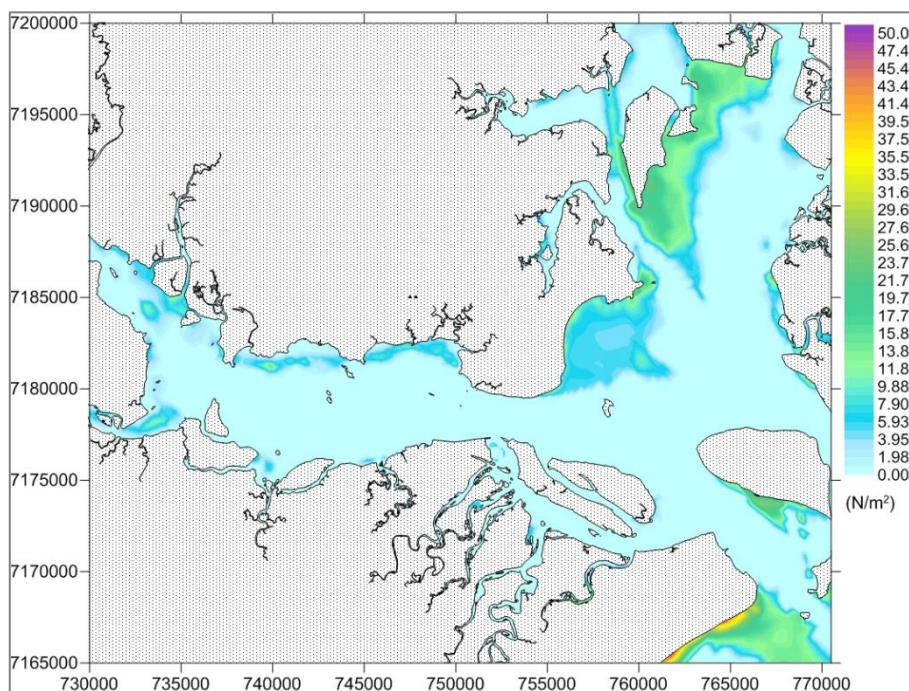
**Tabela 17 - Tensão de cisalhamento crítica em função do diâmetro do sedimento.**

Tipo de Sedimento	D <sub>50</sub> mm	Shields	Tensão Crítica N/m <sup>2</sup>
Pedra grossa	128 – 256	0,054 – 0,054	112 – 223
Pedra fina	64 – 128	0,052 – 0,054	53,8 – 112
Cascalho muito grosso	32 – 64	0,050 – 0,052	25,9 – 53,8
Cascalho grosso	16 – 32	0,047 – 0,050	12,2 – 25,9
Cascalho médio	8 – 16	0,044 – 0,047	5,7000 – 12,2
Cascalho Fino	4 – 8	0,042 – 0,044	2,7000 – 5,70
Cascalho muito fino	2 – 4	0,039 – 0,042	1,3000 – 2,70
Areia muito grossa	1 – 2	0,029 – 0,039	0,4700 – 1,30
Areia grossa	0,5 – 1	0,033 – 0,029	0,2700 – 0,47
Areia média	0,25 – 0,5	0,048 – 0,033	0,1940 – 0,27
Areia fina	0,125 – 0,25	0,072 – 0,048	0,1450 – 0,194
Areia muito fina	0,0625 – 0,125	0,109 – 0,072	0,1100 – 0,145
Silte Grosso	0,0310 – 0,0625	0,165 – 0,109	0,0826 – 0,110
Silte médio	0,0156 – 0,0310	0,250 – 0,165	0,0630 – 0,0826

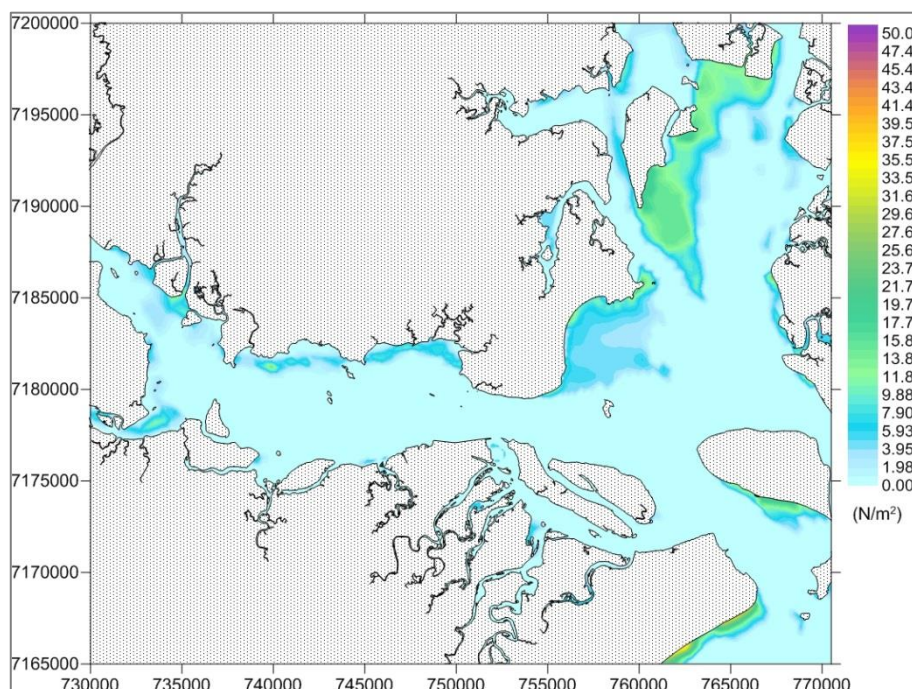
Fonte: <https://pubs.usgs.gov/sir/2008/5093/table7>

De maneira geral, o fundo da área de interesse desse estudo, é composto basicamente por areia média, areia fina e silte. Com base na Tabela 17, verifica-se que a tensão de cisalhamento necessária para movimentar esse tipo de sedimento, deve estar entre  $0,063 \text{ N/m}^2 < t_c < 0,27 \text{ N/m}^2$ . Ou seja, para que haja mobilização dos sedimentos, as ondas necessitam de energia suficiente para criar tensões de cisalhamento dessa ordem de grandeza.

Nesse contexto, a Figura 203 apresenta o mapa de tensão de cisalhamento de fundo obtido com a simulação de passagem de frente fria durante o verão. De forma coerente, as maiores tensões ocorreram nas áreas de ocorrência das maiores ondas. Na área de maior interesse, área de impacto direto dos futuros empreendimentos, as ondas simuladas apresentaram amplitudes muito pequenas e as tensões de cisalhamento são praticamente nulas. Assim, não se espera que ocorra influências de ondas geradas por ventos locais no transporte de sedimento. Para o cenário Diag-Inverno (Figura 204), as tensões no fundo são menos intensas. Somente em algumas pequenas regiões, como na desembocadura do Rio Nhundiaquara, o valor dessa grandeza apresentou valores da ordem de  $15,0 \text{ N/m}^2$ , já na área de dos futuros empreendimentos, os valores alcançados não possuem capacidade de perturbação dos sedimentos de fundo.



**Figura 203 - Distribuição espacial da tensão no fundo durante uma ocorrência de frente fria – Cenário Diag-Verão.**

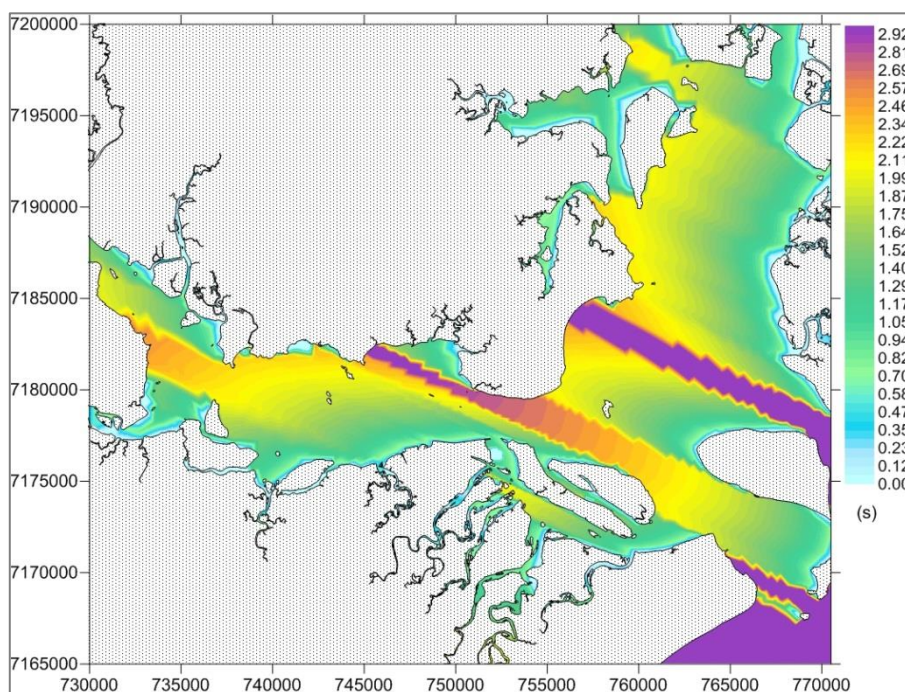


**Figura 204 - Distribuição espacial da tensão no fundo durante uma ocorrência de frente fria – Cenário Diag-Inverno.**

Uma terceira situação analisada utilizou o campo de vento mais frequente, caracterizado por apresentar intensidade entre 1,0 e 2,0 m/s e direção sudeste. Esse cenário foi realizado para entender o comportamento das ondas geradas pelo vento em condições médias, observadas



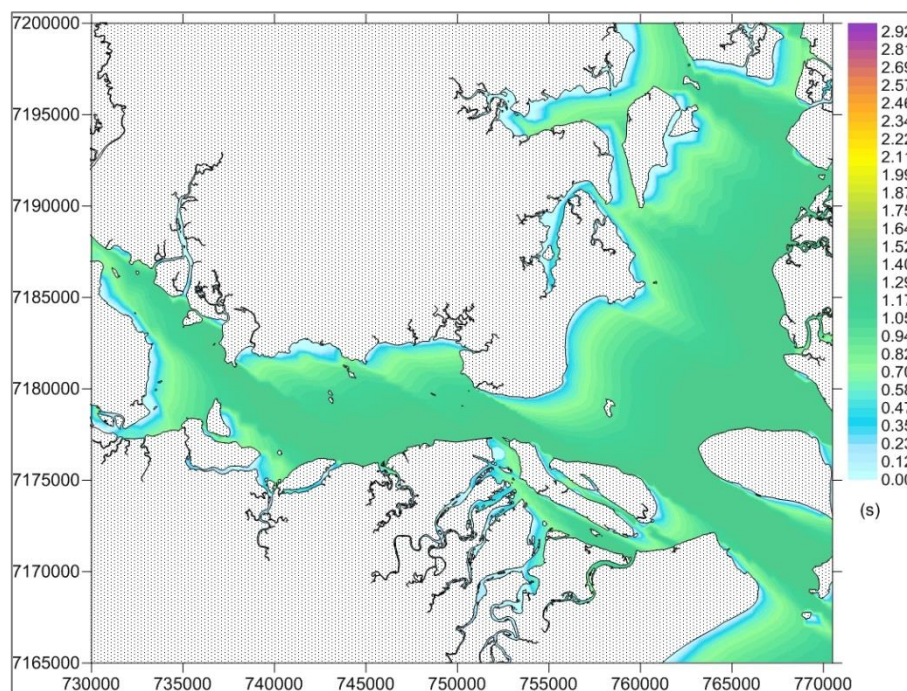
na maior parte do tempo. Para o verão, a região portuária da Baía de Paranaguá apresentou ondas com períodos máximos da ordem de 1,4 s (Figura 205), e como pode ser observado na Figura 207, essas ondas estiveram associadas a pequenas alturas significativas, com amplitudes da ordem de 2,0 cm.



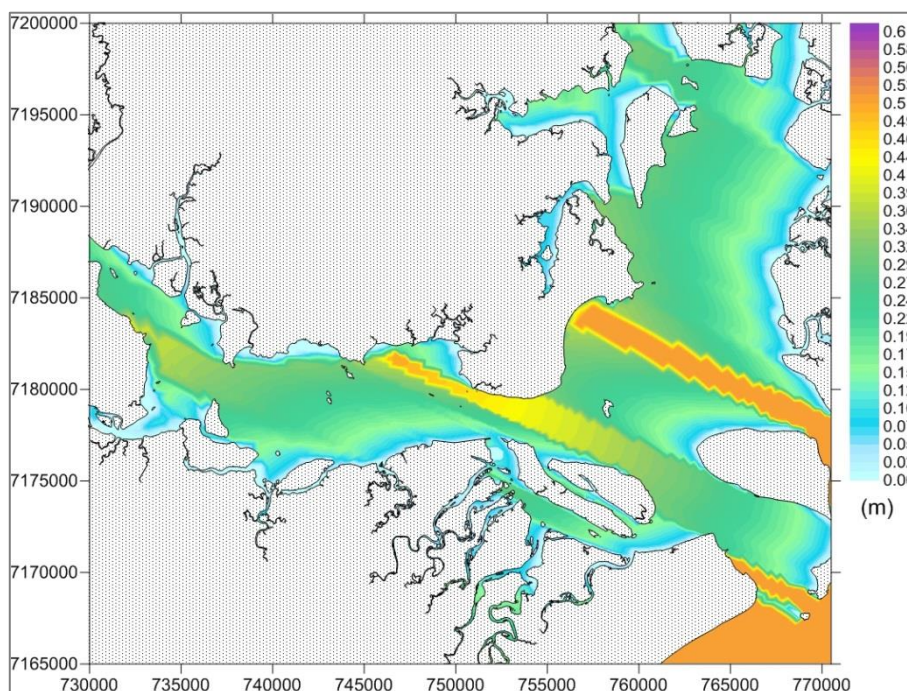
**Figura 205 - Distribuição espacial do período das ondas durante uma ocorrência de velocidade e direção de maior frequência – Cenário Diag-Verão.**

Para situações de vento predominante no período de Inverno, o campo de vento gerou pouca perturbação nas águas superficiais do estuário. Como pode ser observado na Figura 206 e na Figura 208, os períodos são da ordem de no máximo 1,5 s e alturas significativas são da ordem de 1,2 cm. Campos de ondas com essas características não geram energia suficiente para perturbar o fundo da baía, e conseqüentemente os sedimentos. Com base na Tabela 17, as tensões de cisalhamento necessárias para transportar sedimento na área de interesse deve ser superiores a 0,063 N/m<sup>2</sup>. Os mapas de tensão de cisalhamento de fundo para o período de Verão (Figura 209) e para o período de inverno (Figura 210) mostram valores de tensão de cisalhamento muito baixos e bem próximos a zero em toda a área de maior interesse.



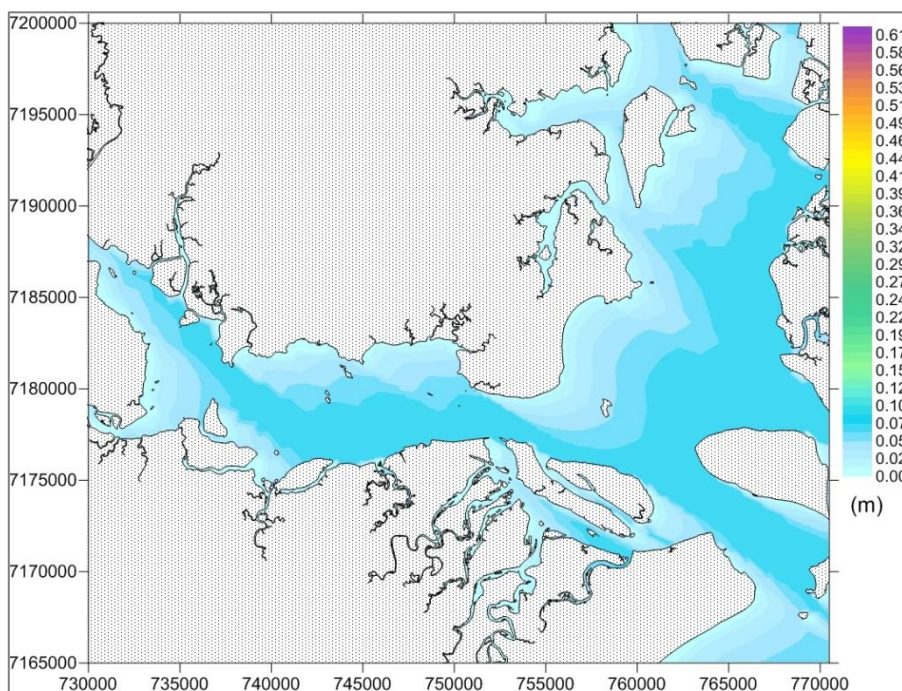


**Figura 206 - Distribuição espacial do período das ondas durante uma ocorrência de velocidade e direção de maior frequência – Cenário Diag-Inverno.**

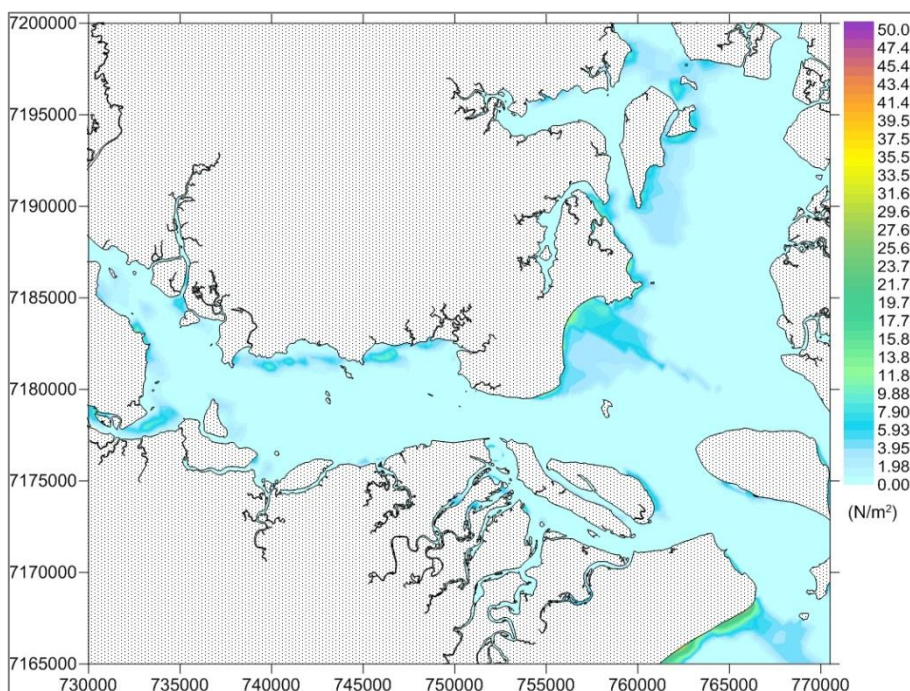


**Figura 207 - Distribuição espacial da altura significativa das ondas durante uma velocidade e direção de maior frequência - Cenário Diag-Verão.**

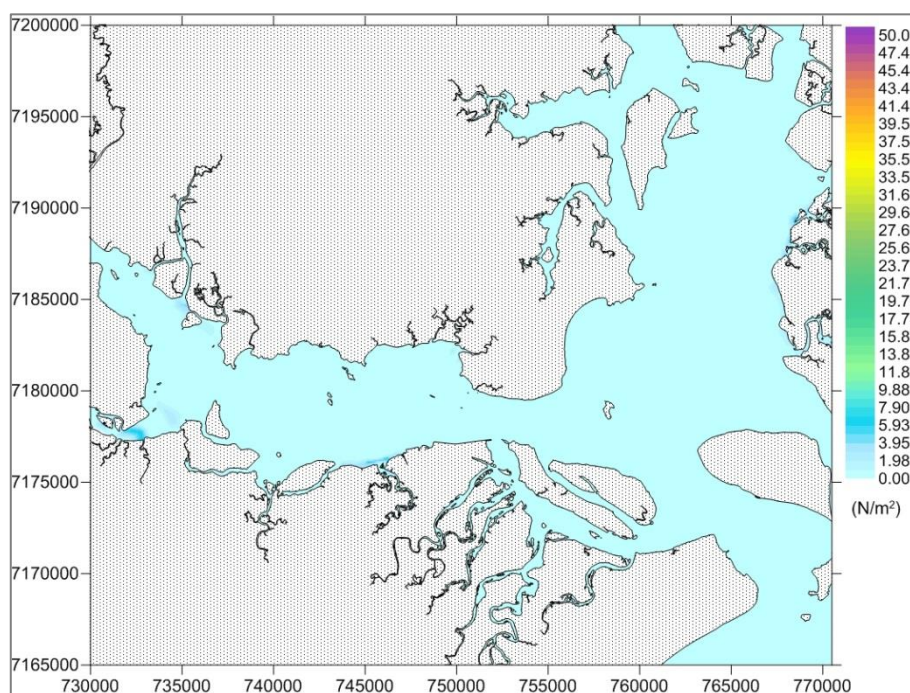




**Figura 208 - Distribuição espacial da altura significativa das ondas durante uma velocidade e direção de maior frequência - Cenário Diag-Inverno.**



**Figura 209 - Distribuição espacial da tensão no fundo durante uma ocorrência de velocidade e direção de maior frequência – Cenário Diag-Verão.**



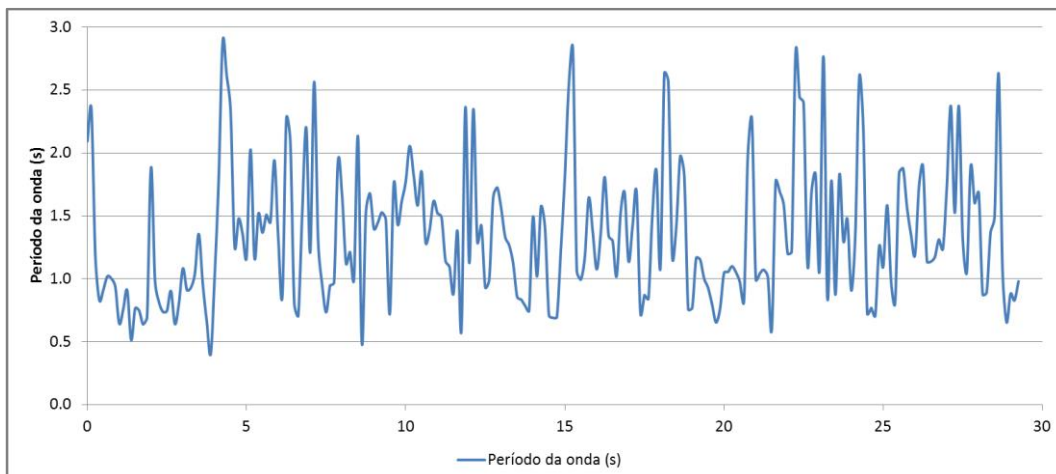
**Figura 210 - Distribuição espacial da tensão no fundo durante uma ocorrência de velocidade e direção de maior frequência – Cenário Diag-Inverno.**

### 1.6.2 Resultados para os Cenários Prog-Verão e Prog-Inverno

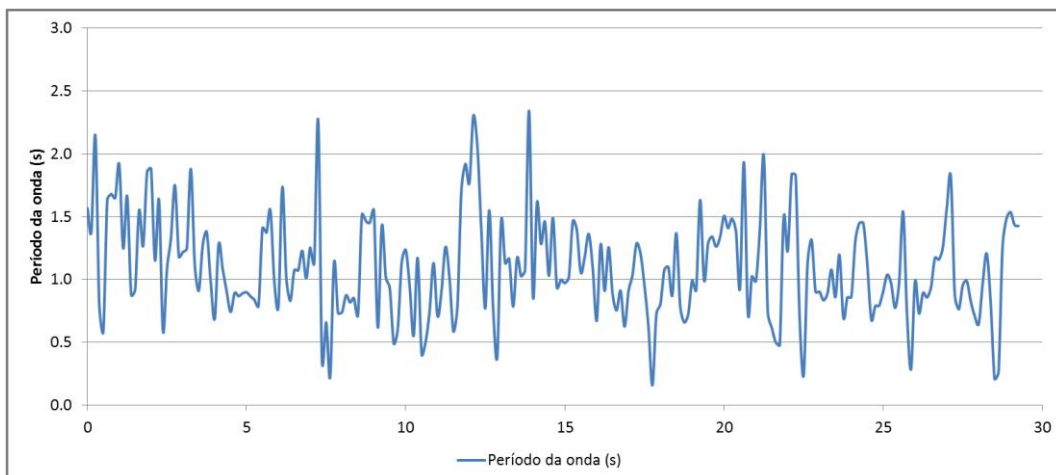
A verificação dos impactos, no comportamento das ondas provocados pelas mudanças nas características morfológicas decorrentes da implantação dos empreendimentos foi realizada utilizando as mesmas informações básicas (vento para Verão e Inverno) utilizadas nas simulações de diagnóstico (cenários Diag-Verão e Diag-Inverno). Conforme descrito na seção 1.3.5, a diferença entre os dois é a batimetria – nos cenários Prog-Verão e Prog-Inverno se considera a implantação dos píeres T, F, L e do Complexo Náutico, o que inclui a construção dos mesmos e das dragagens de áreas relacionadas a cada um deles.

Para os cenários de prognóstico, os resultados temporais e espaciais compreendem as mesmas variáveis apresentadas para os cenários de diagnóstico. De maneira geral, observa-se que não houve alterações significativas em relação ao comportamento geral das ondas geradas pelo vento dentro do estuário. As séries temporais de período de onda para o ponto de interesse apresentado na Figura 32, são apresentadas na Figura 211 e na Figura 212 (respectivamente para Verão e Inverno) mostram que os períodos de onda predominantes ficam entre 2,5 e 3,0 s para Verão, e entre 2,0 e 2,5 s para o Inverno. Tanto para o Verão quanto para o Inverno (Figura 213 e Figura 214), as máximas amplitudes geradas não ultrapassaram 0,5 m na área de interesse, sendo que em média as amplitudes ficaram ao redor de 0,1 m para o Verão e abaixo desse valor para o inverno.

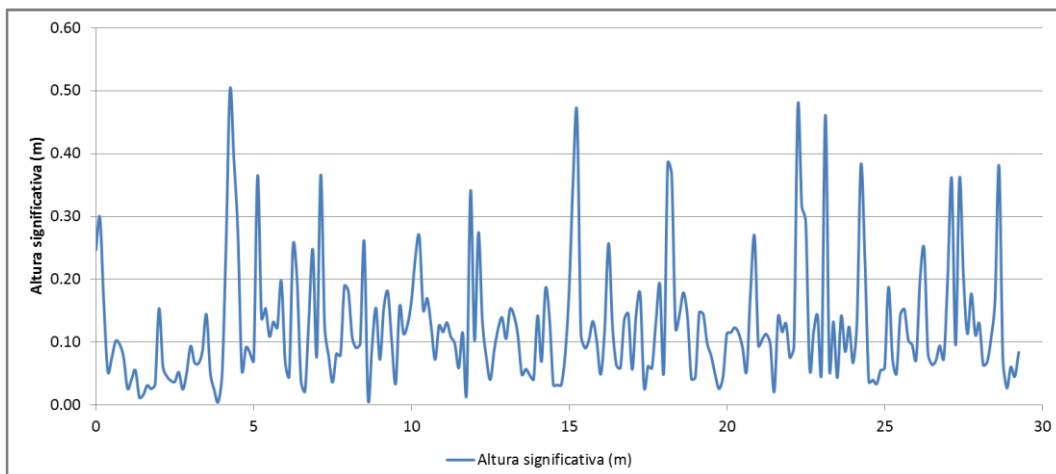




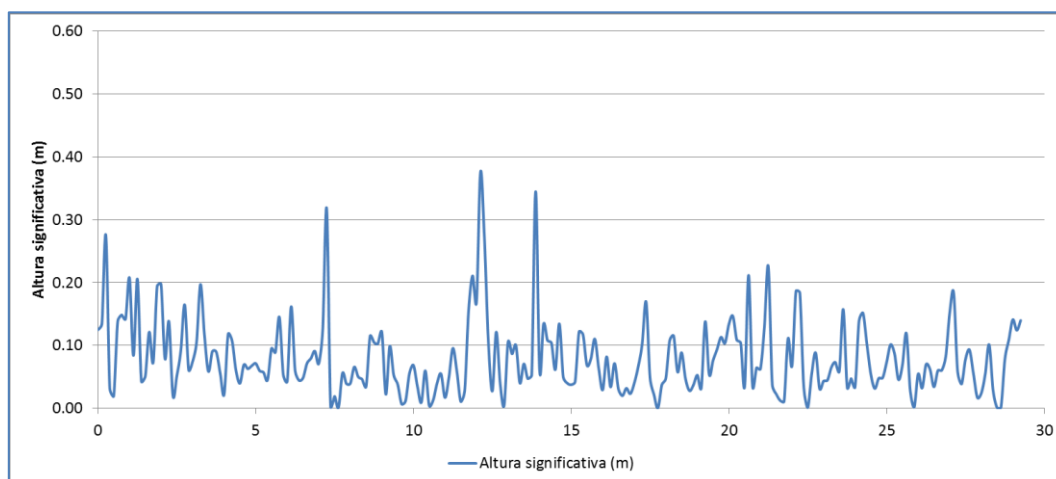
**Figura 211 - Série temporal do período de onda – Cenário Prog-Verão.**



**Figura 212 - Série temporal do período de onda – Cenário Prog-Inverno.**



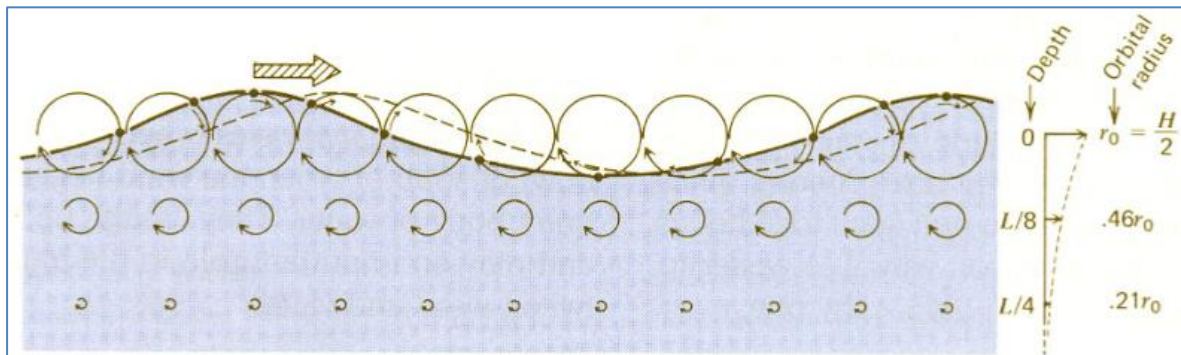
**Figura 213 - Série temporal da altura significativa – Cenário Prog -Verão.**



**Figura 214 - Série temporal da altura significativa – Cenário Prog-Inverno.**

Da mesma forma que os resultados obtidos nas simulações com a geometria de fundo original, as ondas geradas nas simulações atuais não possuem energia suficiente para movimentar os sedimentos de fundo. Isso ocorre porque, uma vez que essas ondas possuem períodos curtos, o comprimento delas deve ser relativamente pequeno. Com isso, o movimento orbital gerado pela passagem da onda não deve alcançar o fundo. Para melhor interpretar essa ideia, observa-se na Figura 215 a representação esquemática do movimento orbital provocado nas partículas do fluido pela passagem de uma onda. O movimento da molécula de água abaixo de uma onda sofre ondulações cíclicas, subindo e indo para frente com a aproximação da crista de onda e descendo e indo para trás após sua passagem. Deste modo o movimento líquido é circular. Esse movimento orbital decresce com a profundidade. Numa profundidade maior que a metade do comprimento da onda, o movimento torna-se desprezível, com as ondas tendo pouco efeito sobre o fundo e o fundo tendo pouco efeito sobre as ondas. Com isso, como as ondas geradas localmente são relativamente curtas, o movimento orbital das partículas não chega a atingir o fundo, não ocorrendo a perturbação dos sedimentos.

A Tabela 18 apresenta as principais características de ondas oceânicas. As ondas, tipo “Chop”, geradas por ventos locais possuem período entre 1,0 e 10,0 s e comprimento entre 1,0 e 10,0 m – características semelhantes às das ondas simuladas nesses experimentos numéricos.



**Figura 215 - Movimento orbital provocado pela passagem de uma onda (Fonte: Holthuijsen, 2007).**

**Tabela 18 - Características de ondas oceânicas.**

Onda	Período	Comprimento	Tipo de Onda	Forçante
Capilar	< 0,1 s	< 2 cm	profunda - rasa	ventos locais
Chop	1-10 s	1-10 m	profunda- rasa	vento locais
Swell	10-30 s	> dezenas m	profunda- rasa	tempestades distantes
Seiche	10 min- 10 h	> dezenas Km	rasa - intermediaria	vento, ressonância de maré
Tsunami	10-60 min	> dezenas Km	rasa - intermediaria	distúrbio submarinos
Maré	12,4-24,8 h	centenas de Km	rasa	Astronômica

Fonte: Butterworth-Heinemann e Keynes, 1999

A Figura 216 e a Figura 217 apresentam a distribuição espacial do período das ondas simuladas para os cenários Prog-Verão e Prog-Inverno, respectivamente. Da mesma forma que nas simulações anteriores, na região de interesse, os períodos apresentam valores baixos, variando entre 1,0 e 1,5 s. A altura das ondas também foi relativamente pequena, variando entre 2,0 e 5,0 cm (Figura 218 e Figura 219). De forma análoga aos resultados anteriores, essas ondas não possuem energia suficiente para perturbar o sedimento de fundo da baía. Os mapas de tensão (Figura 220 e Figura 221) de cisalhamento de fundo mostram valores abaixo das tensões críticas de cisalhamento necessárias para que ocorra movimentos significativos de sedimento. Assim, não se observa nenhuma perturbação no campo de ondas devido às mudanças na morfologia de fundo provocadas pelas dragagens de aprofundamento e implantação dos empreendimentos.



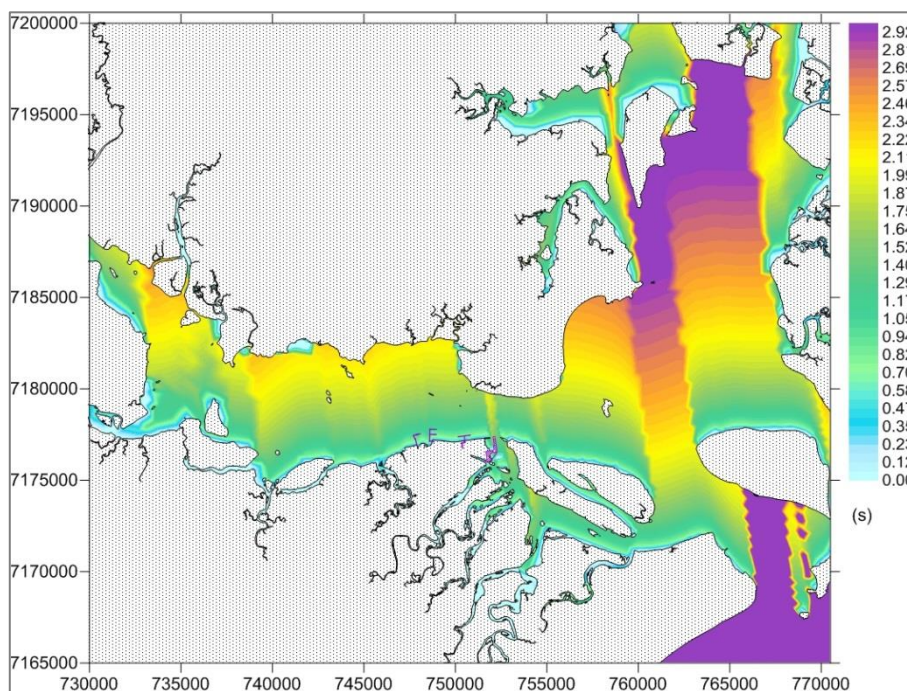


Figura 216 - Distribuição espacial do período das ondas durante uma ocorrência de frente fria – Cenário Prog-Verão.

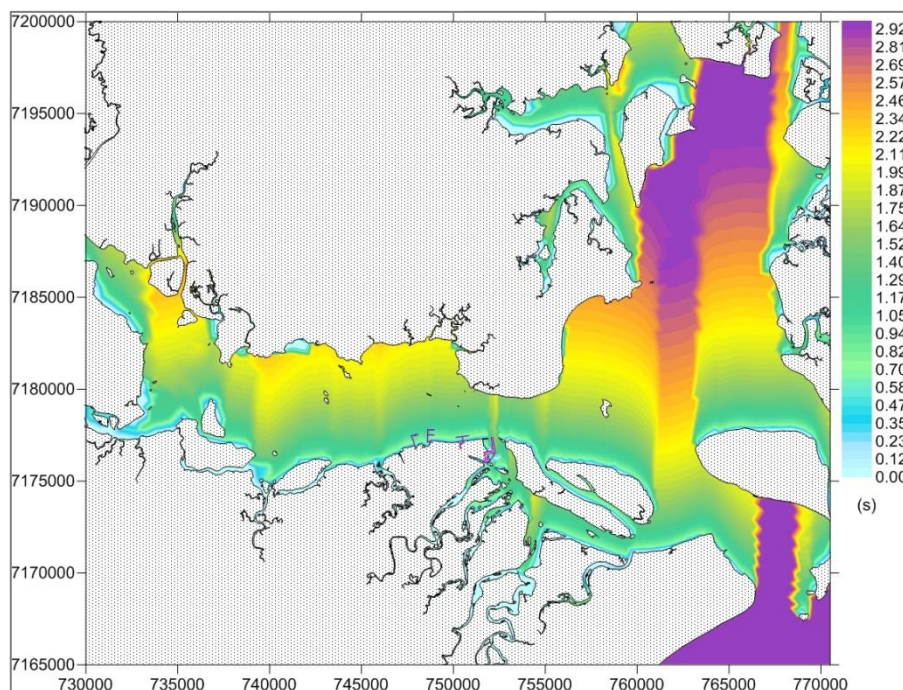
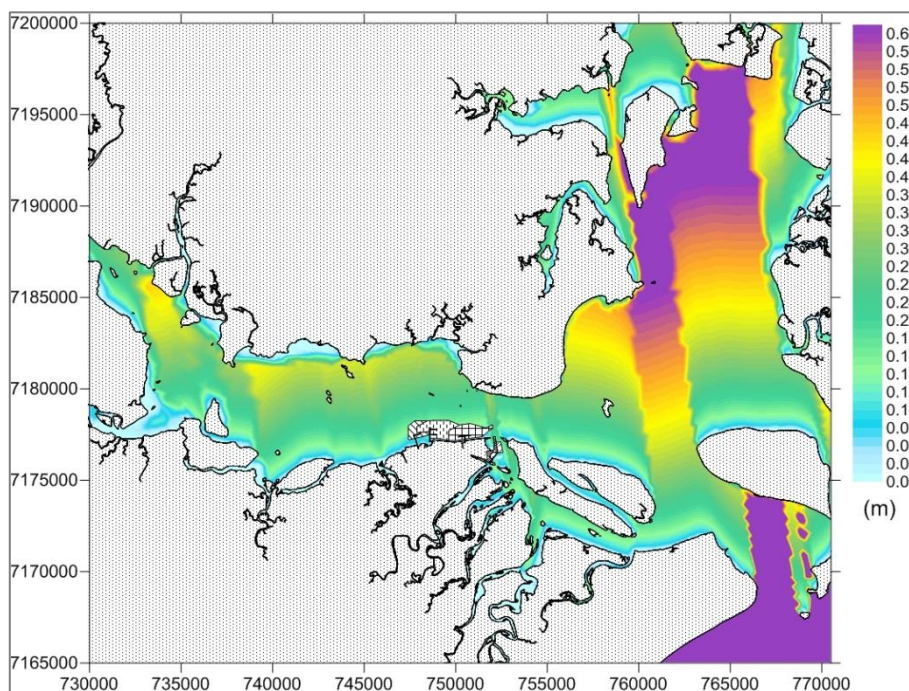
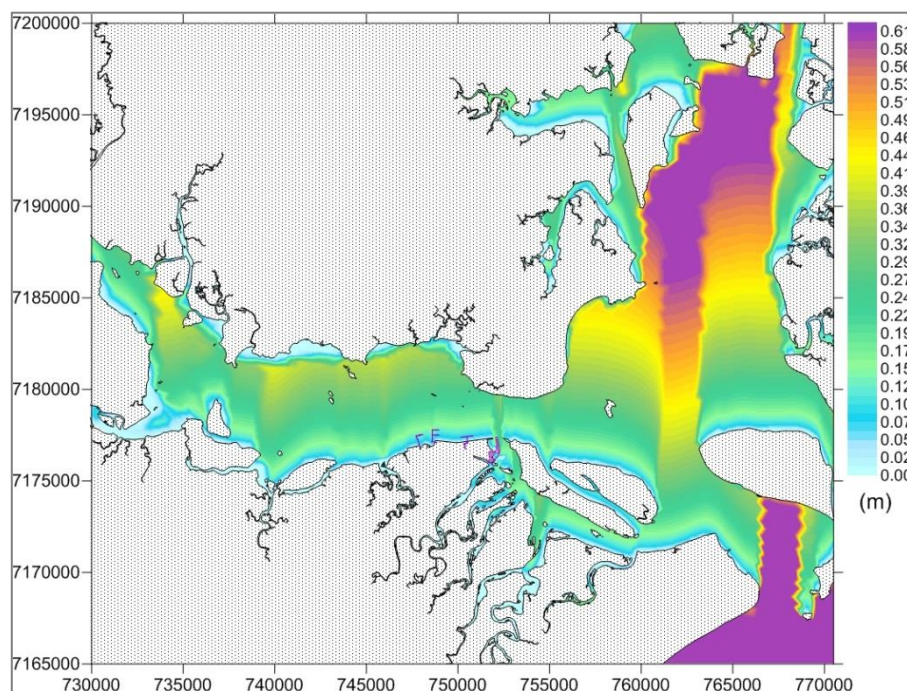


Figura 217 - Distribuição espacial do período das ondas durante uma ocorrência de frente fria – Cenário Prog-Inverno.



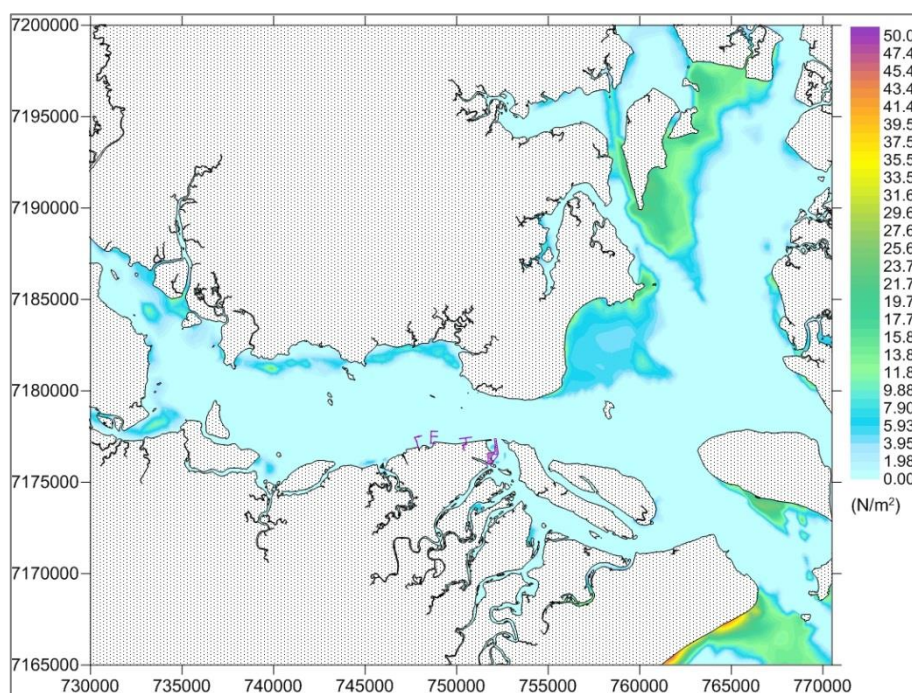


**Figura 218 - Distribuição espacial da altura significativa das ondas durante uma ocorrência de frente fria - Cenário Prog-Verão.**

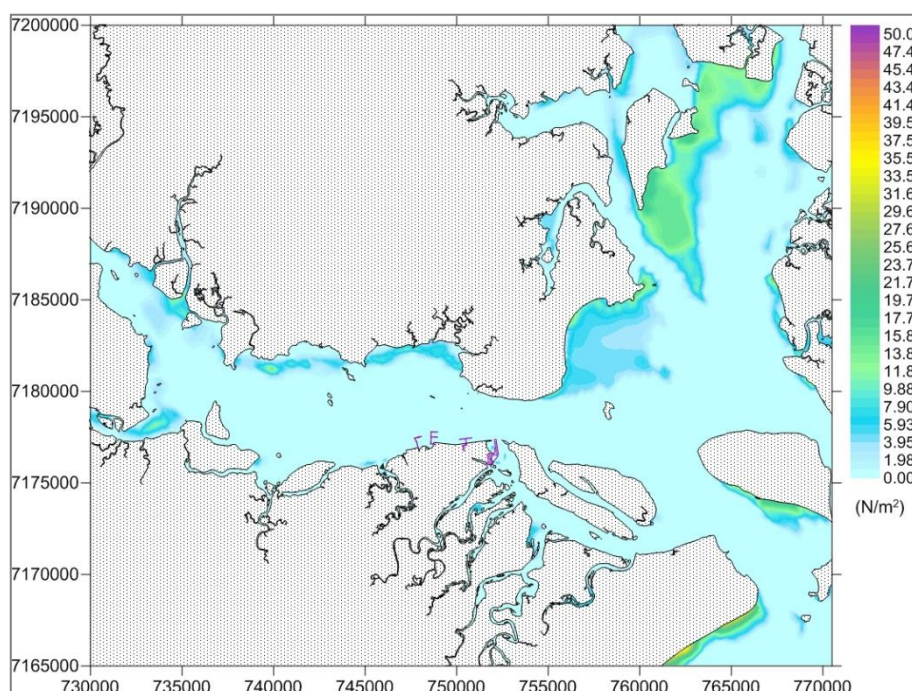


**Figura 219 - Distribuição espacial da altura significativa das ondas durante uma ocorrência de frente fria - Cenário Prog-Inverno.**





**Figura 220 - Distribuição espacial da tensão no fundo durante uma ocorrência de frente fria – Cenário Prog-Verão.**



**Figura 221 - Distribuição espacial da tensão no fundo durante uma ocorrência de frente fria – Cenário Prog-Inverno.**

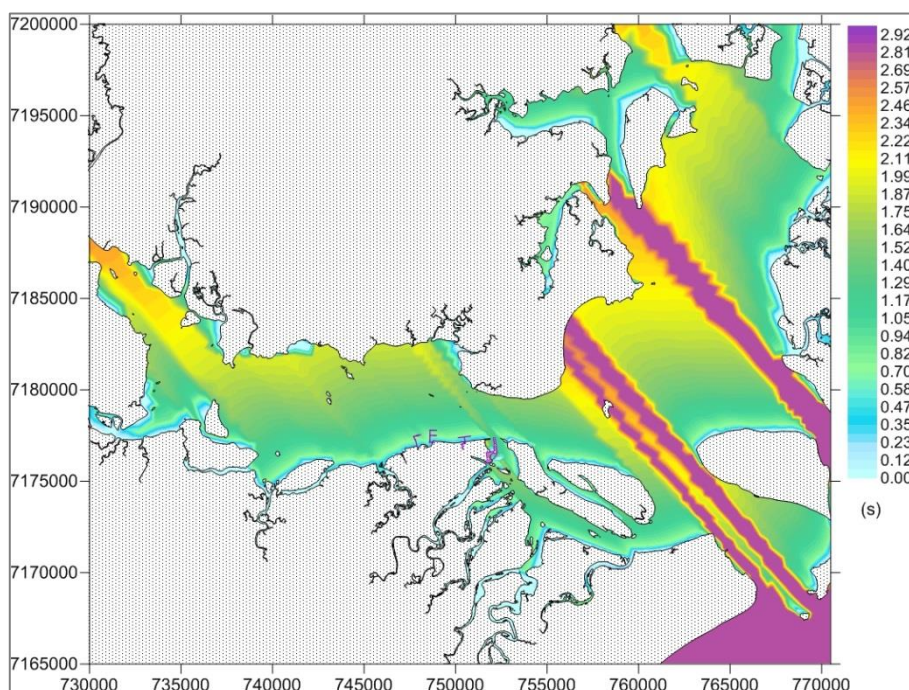
Para situações de vento predominante (entre 1,0 e 2,0 m/s com direção sudeste), da mesma forma que nos cenários de diagnóstico, em Verão e Inverno, os resultados espaciais são apresentados abaixo. Como mencionado anteriormente, as ondas geradas por forçantes



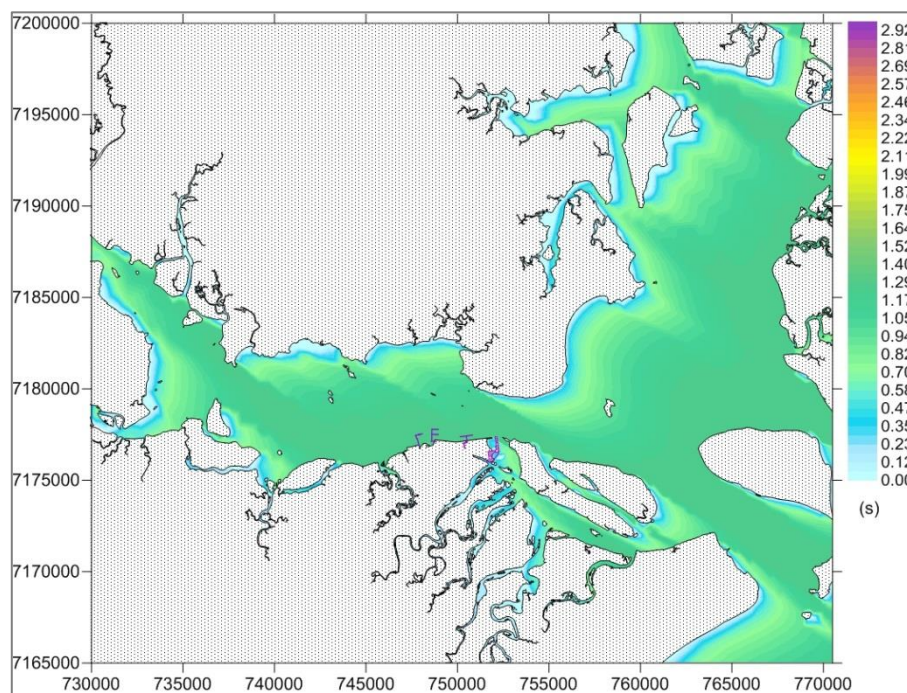
locais apresentam baixo período e baixa amplitude. Isso se deve a dois motivos principais: (1) obstáculos naturais reduzem a dimensão das pistas de ondas, e (2) as intensidades dos ventos são relativamente baixas quando comparados a campos de vento observados em mar aberto.

Com base no resultado apresentado nas Figura 222 e Figura 223, observa-se a resposta do campo de ondas em função do campo de vento aplicado. Ou seja, as pistas de onda se desenvolvendo na mesma direção da forçante atmosférica. O período e altura significativa das ondas geradas apresentaram exatamente o mesmo comportamento dos resultados anteriormente discutidos. Assim, verifica-se que a mudança na geometria do fundo não afeta o comportamento das ondas superficiais na área de maior interesse. Da mesma forma como já discutido anteriormente, isso se deve ao fato das ondas locais apresentarem baixas amplitudes (Figura 224 e Figura 225).

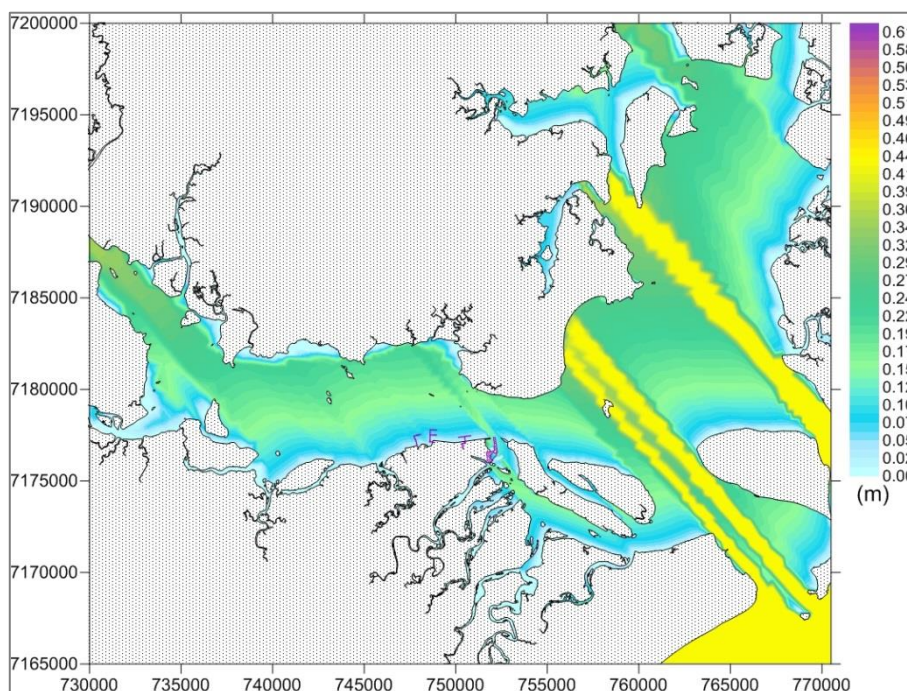
A Figura 226 e Figura 227 apresentam as tensões de cisalhamento de fundo para as situações de vento predominante para Verão e Inverno, respectivamente. Na área de maior interesse as tensões de fundo geradas por forçantes locais, possuem valores muito baixos, próximos de zero. Isso sugere que a energia proveniente dessas ondas não é suficiente para gerar perturbações nos sedimentos no fundo da baía. Fato já observado nas simulações anteriores, inclusive nas simulações de diagnóstico – isto significa que a geometria de fundo não altera o regime de ondas geradas pelo vento.



**Figura 222 - Distribuição espacial do período das ondas durante uma ocorrência de velocidade e direção de maior frequência – Cenário Prog-Verão.**

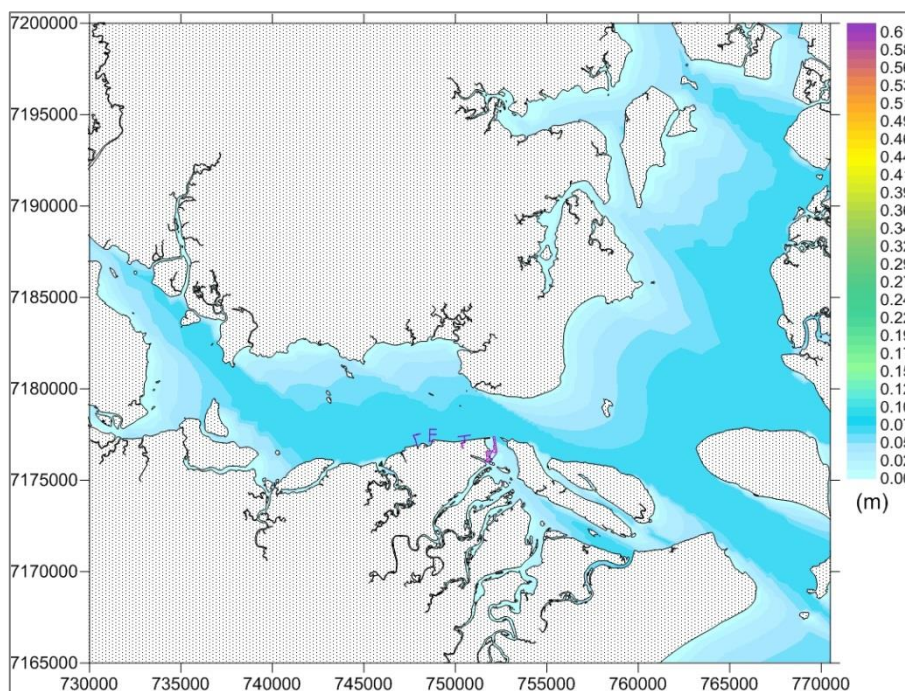


**Figura 223 - Distribuição espacial do período das ondas durante uma ocorrência de velocidade e direção de maior frequência – Cenário Prog –Inverno.**

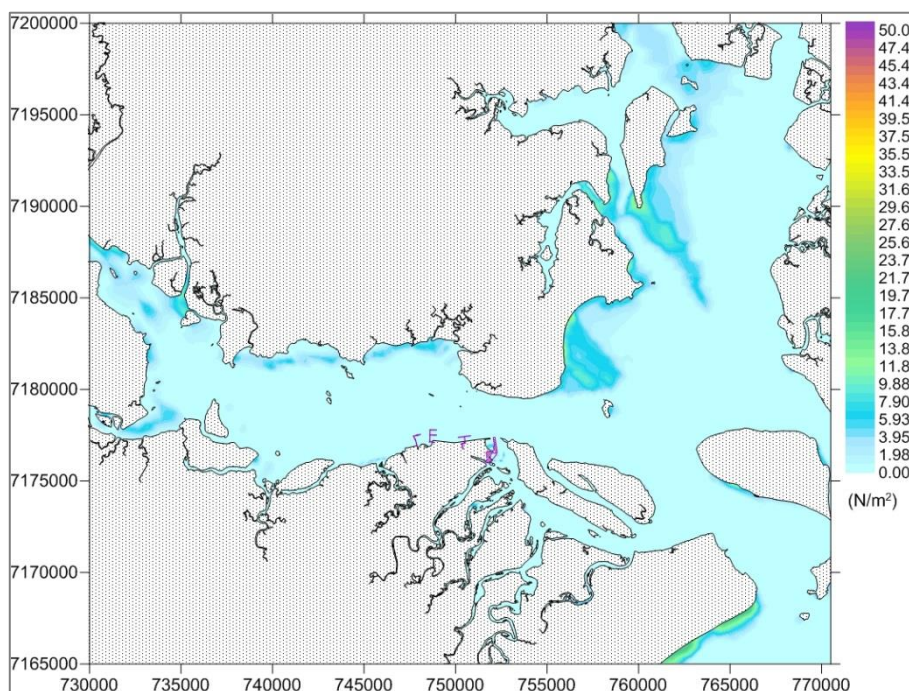


**Figura 224 - Distribuição espacial da altura significativa das ondas durante uma velocidade e direção de maior frequência - Cenário Prog -Verão.**



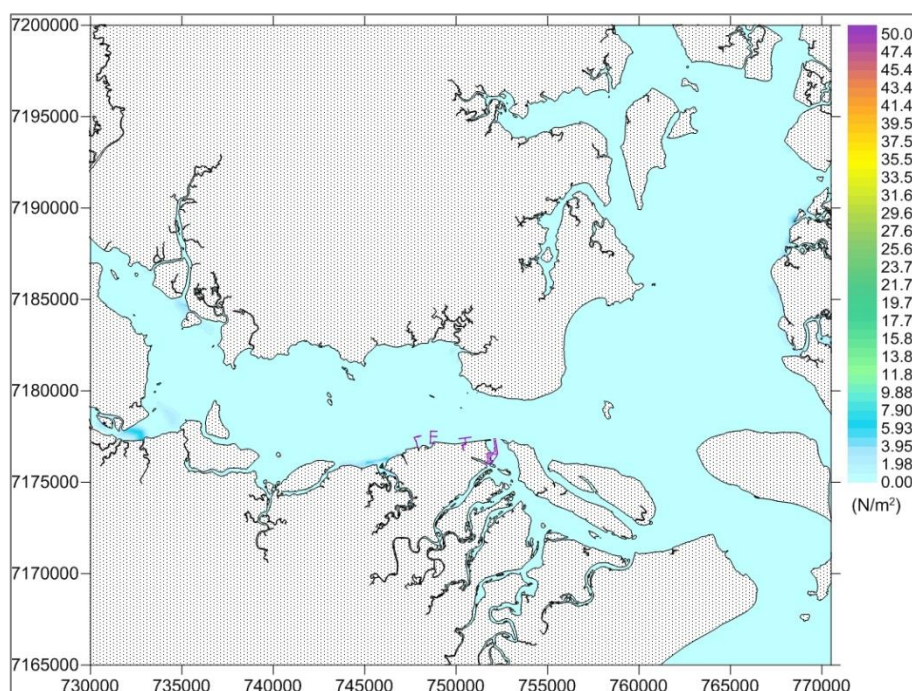


**Figura 225 - Distribuição espacial da altura significativa das ondas durante uma velocidade e direção de maior frequência - Cenário Prog -Inverno.**



**Figura 226 - Distribuição espacial da tensão no fundo durante uma ocorrência de velocidade e direção de maior frequência – Cenário Prog -Verão.**







**Figura 227 - Distribuição espacial da tensão no fundo durante uma ocorrência de velocidade e direção de maior frequência – Cenário Prog -Inverno.**

## 1.7 Resultados das Simulações de Dragagem

Nesta seção são apresentados os resultados para as simulações dos processos de dragagem relacionados à implantação de cada uma das estruturas de ampliação previstas para o Porto de Paranaguá. Para as simulações de dragagem, conforme a seção 1.3.6, foram definidos 8 diferentes cenários que combinam situações de Verão e Inverno, e a implantação dos 4 empreendimentos – Píer L, Píer F, Complexo Náutico e Píer L.

Para estas simulações serão apresentadas probabilidades de ocorrência de plumas de sedimentos com concentrações superiores a 20,0 mg/L – estas probabilidades foram obtidas considerando todo o período de simulação, ou seja, o período total de dragagem, mais 30 dias – o que garante que todas as partículas de sedimentos finos suspensos durante a dragagem e sejam sedimentadas. Ainda, para o final do período de dragagem, são apresentadas as isolinhas de concentração de sedimentos em suspensão, isolinhas de altura de sedimentação e a nuvem de partículas suspensas espalhadas no estuário.

Destaca-se que as concentrações médias de sedimentos que ocorrem em diferentes corpos de água naturais, são da ordem de 5,0 mg/L em oceanos, 50,0 mg/L em rios e estuários, e de 500,0 mg/L em rios barrentos (Rosman, 2004). Ainda, segundo Lana et al. (2001), na Baía de Paranaguá, as concentrações médias de sedimentos em suspensão variam entre 10 e 120

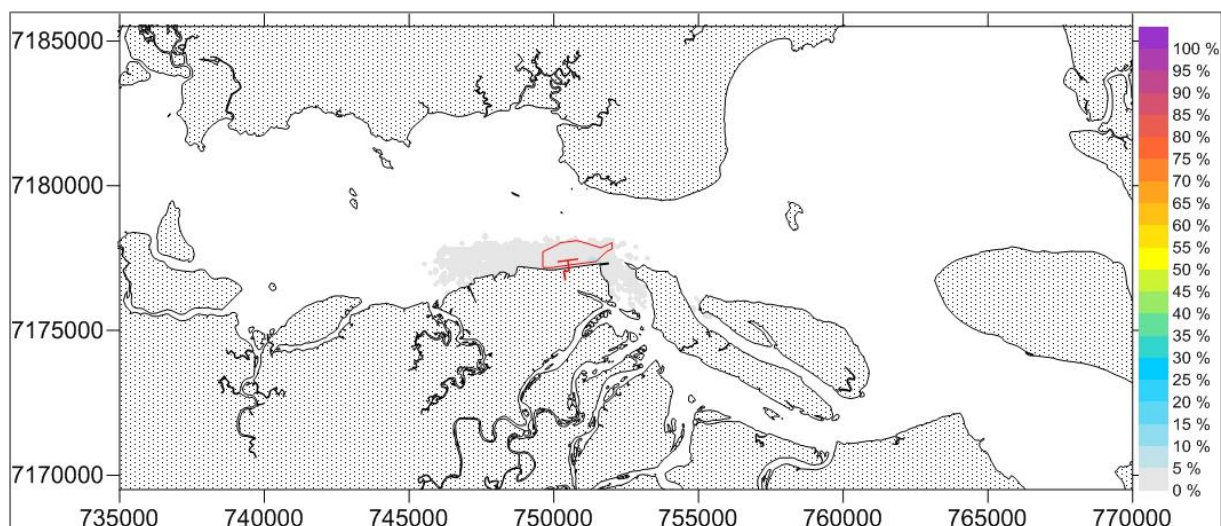
 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	198

mg/l em verões chuvosos, e são cerca de 40% menores durante invernos secos, possivelmente devido à ressuspensão de sedimentos pelo vento e intrusão salina das águas de fundo.

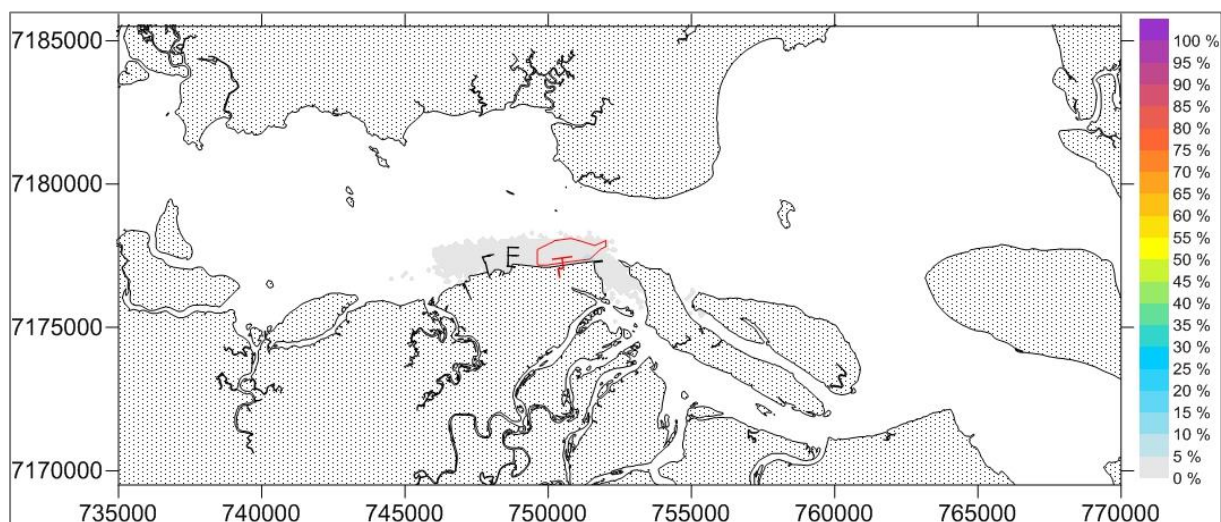
### 1.7.1 Resultados para o Cenário Drag-T

As probabilidades de ocorrência de concentrações maiores do que 20,0 mg/L, respectivamente para os cenários Drag-T – Verão e Drag-T – Inverno são apresentadas na Figura 228 e na Figura 229 - para o cálculo destas probabilidades considera-se o período correspondente ao processo de dragagem do fundo da baía mais 30 dias, ou seja, 221 dias. Observa-se que concentrações maiores do que 20,0 mg/L ocorrem em apenas 5% do tempo, o que corresponde a aproximadamente 11 dias. É importante observar que as concentrações maiores do que 20,0 mg/L podem ocorrer além da área diretamente relacionada ao empreendimento, se estendendo ao longo da margem sul do estuário e entrada do Canal da Cotinga.

A Figura 230 e a Figura 231 mostram as isolinhas de concentração de sedimentos suspensos ao final do período de dragagem (191 dias de simulação) – é possível observar, nos dois casos, que as concentrações de sedimentos suspensos chegam a 60 mg/L, semelhante aos observados para a Baía de Paranaguá. Para o mesmo período, as isolinhas de altura de sedimentação são apresentadas na Figura 232 e na Figura 233. Tanto para Verão quanto para Inverno, as alturas sedimentadas são pequenas, não ultrapassando 0,1 cm em uma pequena área, porém uma altura sedimentada de até 0,05 cm se espalha ao longo de grande parte da baía. Esse espalhamento pode ser confirmado ao se observar a Figura 234 e a Figura 235 onde são apresentadas as nuvens de partículas de sedimentos ao final do período de realização da dragagem. O espalhamento das partículas pode ser explicado pela dinâmica das correntes de maré, o que faz com que elas se dispersem em uma grande área; é importante observar que estas tendem a sair de dentro da baía.

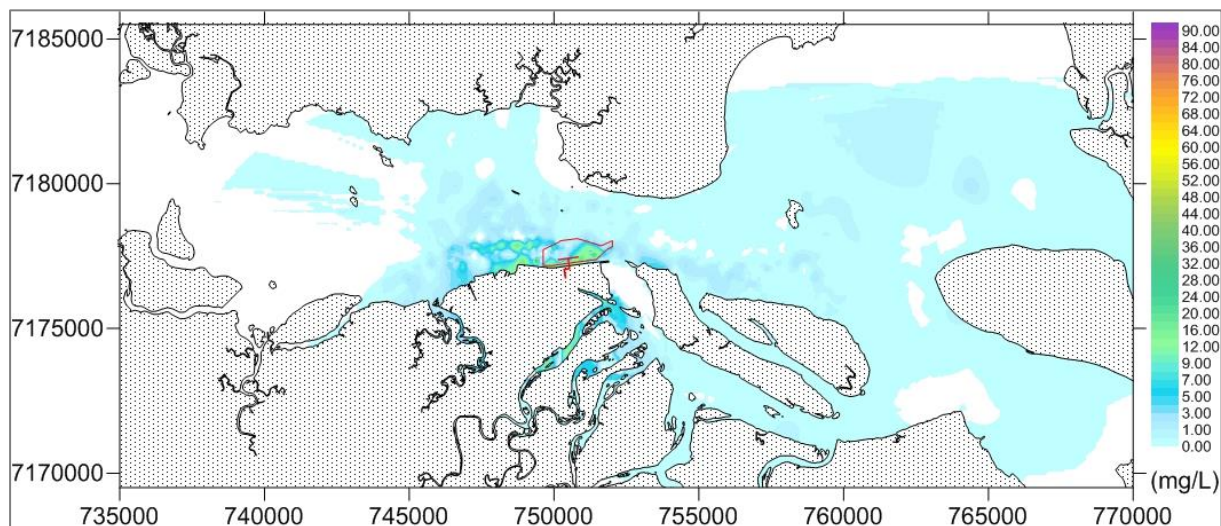


**Figura 228 – Isolinhas de probabilidade de ocorrência de concentração maior do que 20,0 mg/L – Cenário Drag-T – Verão.**

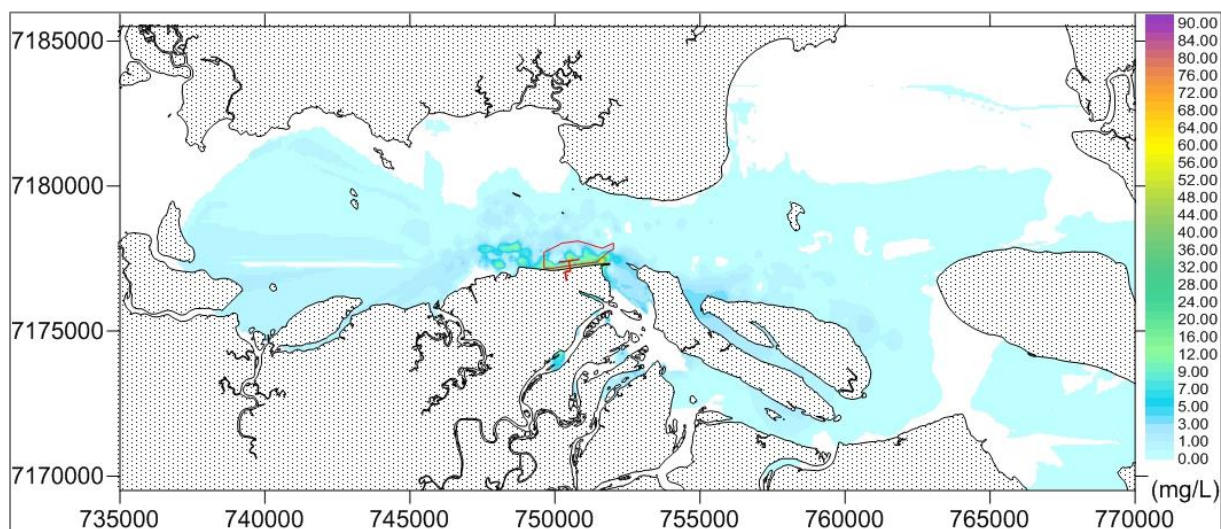


**Figura 229 – Isolinhas de probabilidade de ocorrência de concentração maior do que 20,0 mg/L – Cenário Drag-T – Inverno.**

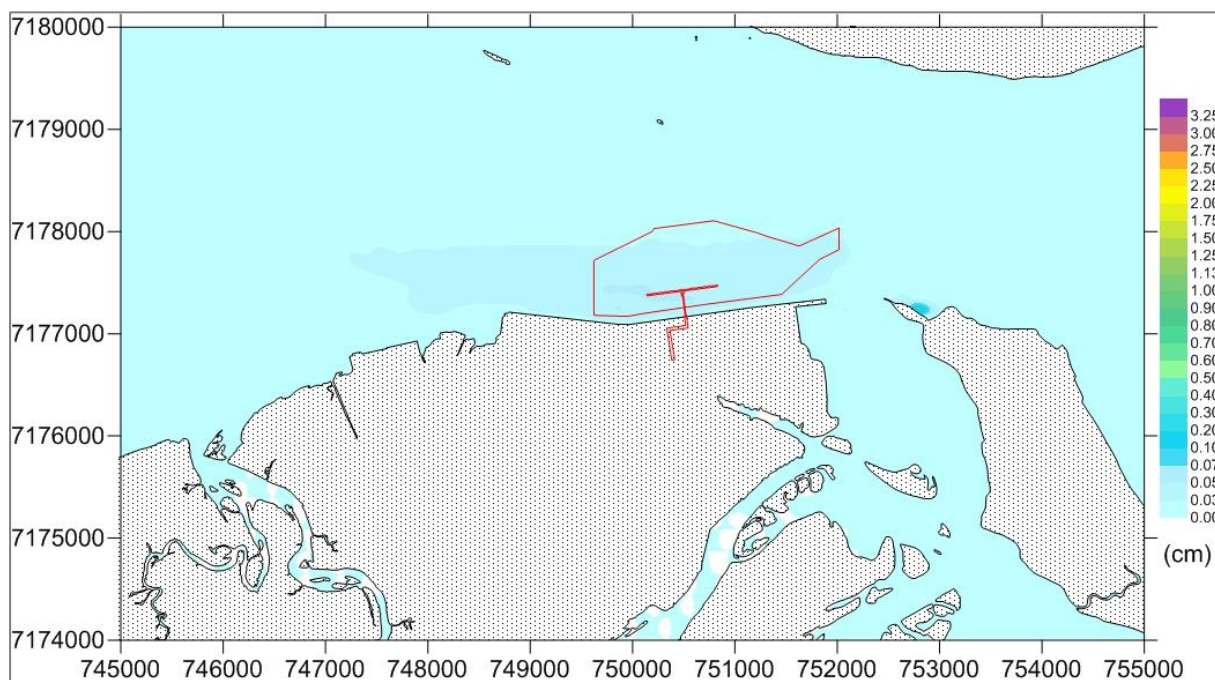




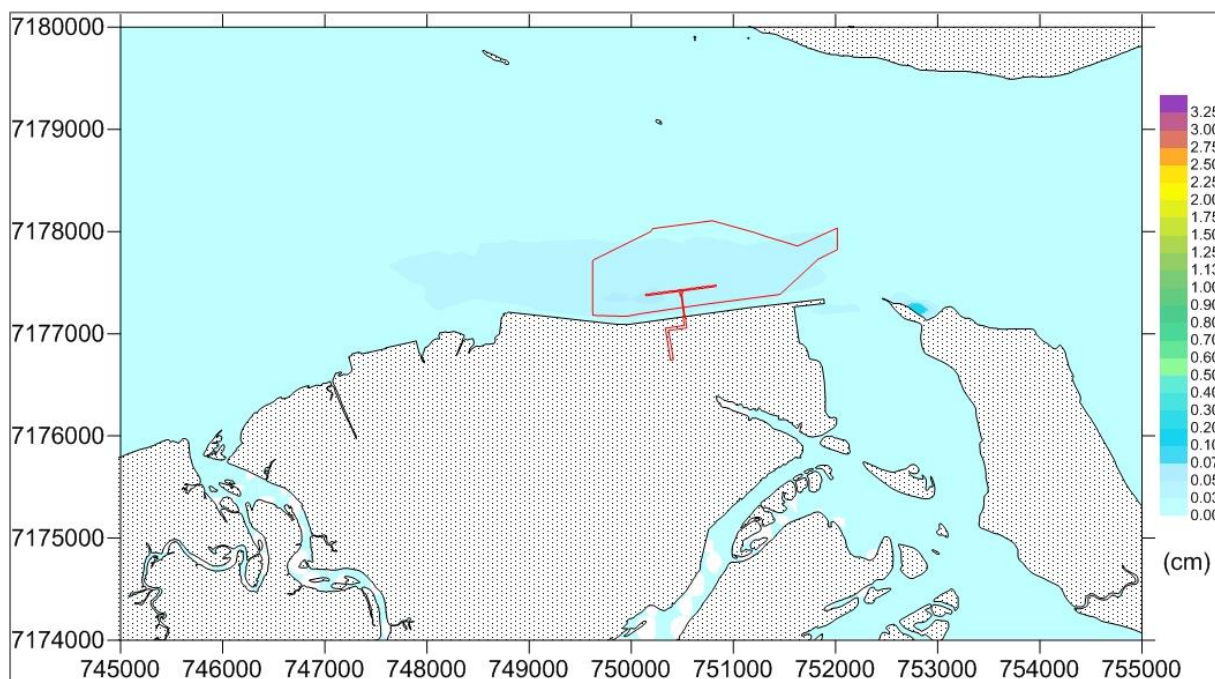
**Figura 230 – Isolinhas de concentração de sedimentos suspensos ao final do período de dragagem – Cenário Drag-T – Verão.**



**Figura 231 – Isolinhas de concentração de sedimentos suspensos ao final do período de dragagem – Cenário Drag-T – Inverno.**

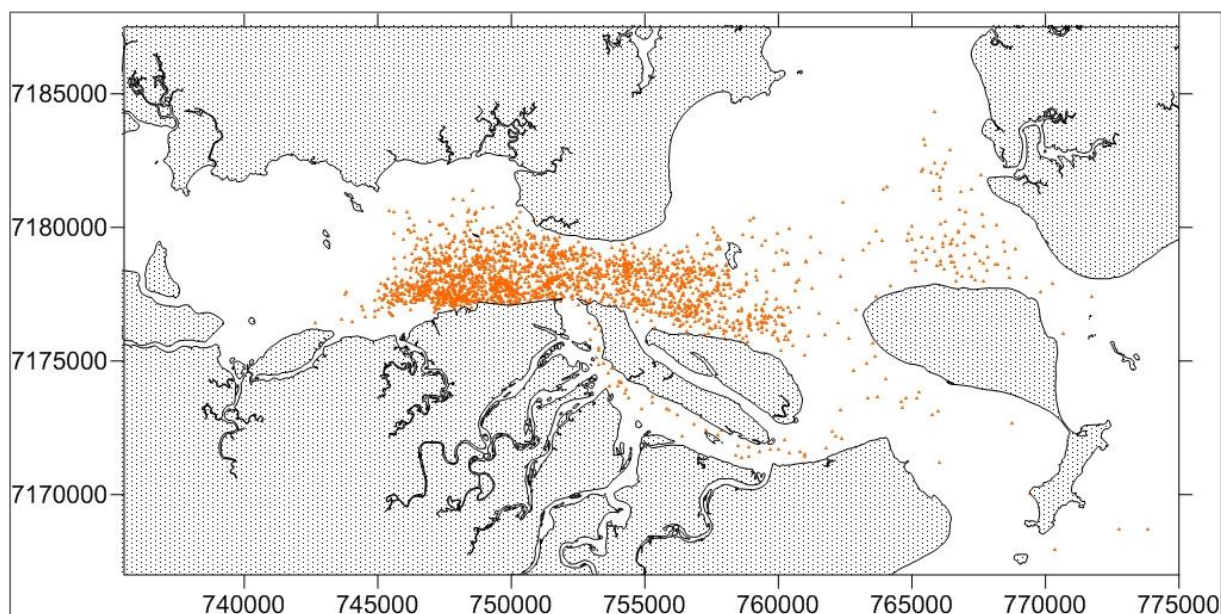


**Figura 232 – Isolinhas de altura de sedimentação ao final do período de dragagem – Cenário Drag-T – Verão.**

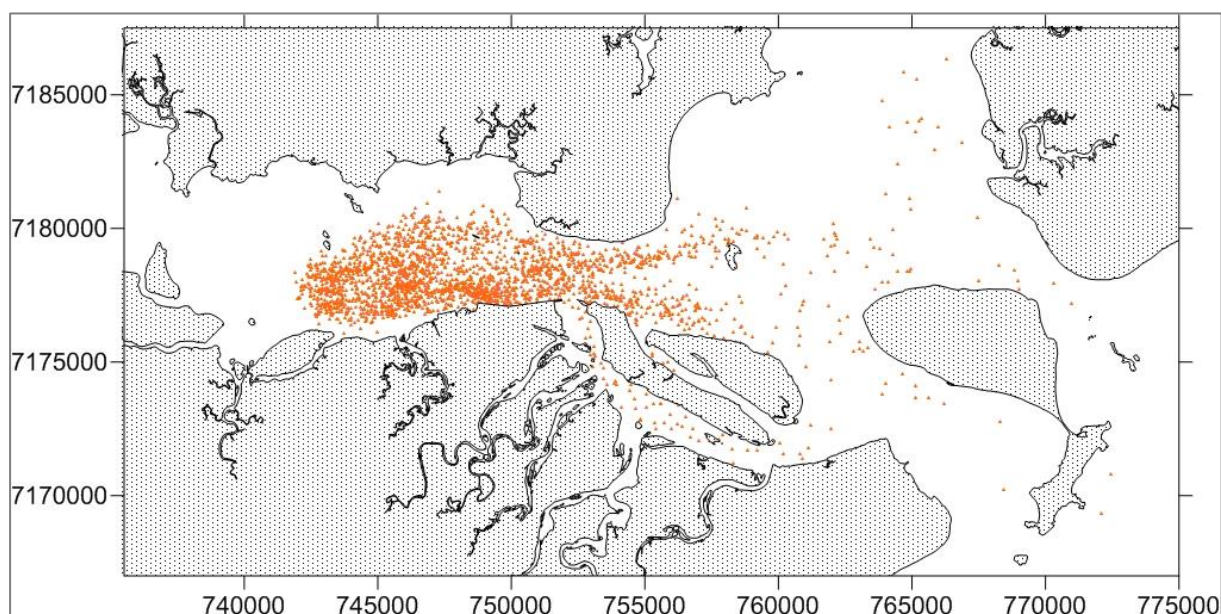


**Figura 233 – Isolinhas de altura de sedimentação ao final do período de dragagem – Cenário Drag-T – Inverno.**





**Figura 234 – Nuvem de partículas suspensas ao final do período de dragagem – Cenário Drag-T – Verão.**





**Figura 235 – Nuvem de partículas suspensas ao final do período de dragagem – Cenário Drag-T – Inverno.**

### 1.7.2 Resultados para o Cenário Drag-F

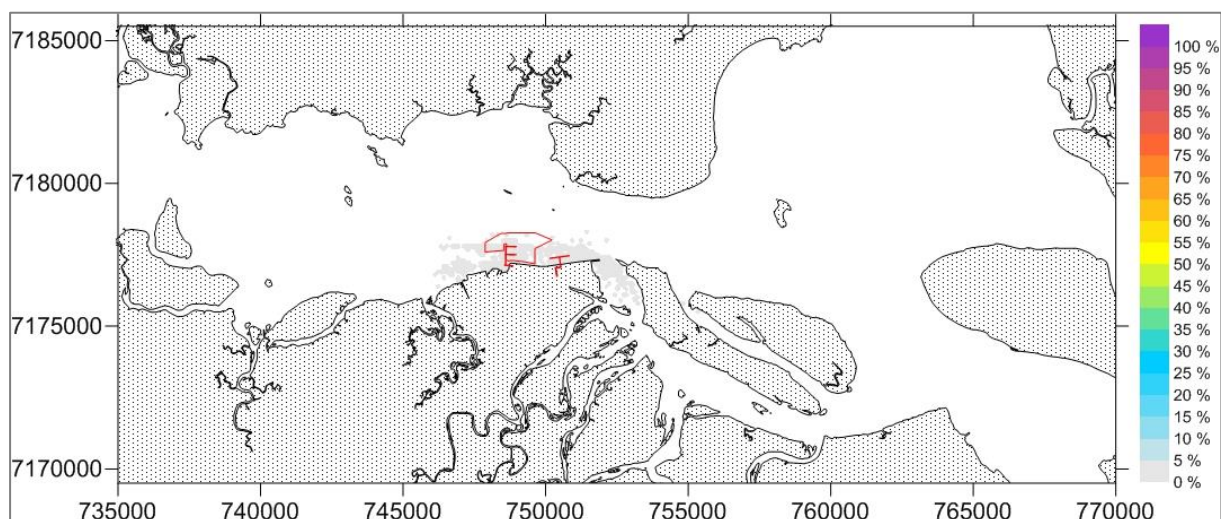
Para os cenários Drag-F – Verão e Drag-F – Inverno, as probabilidades de ocorrência de concentrações maiores do que 20,0 mg/L são apresentadas na Figura 236 e na Figura 237. Essas probabilidades são calculadas para um período de 330 dias (300 dias necessários para realização das dragagens, mais um período de 30 dias para sedimentação dos sedimentos



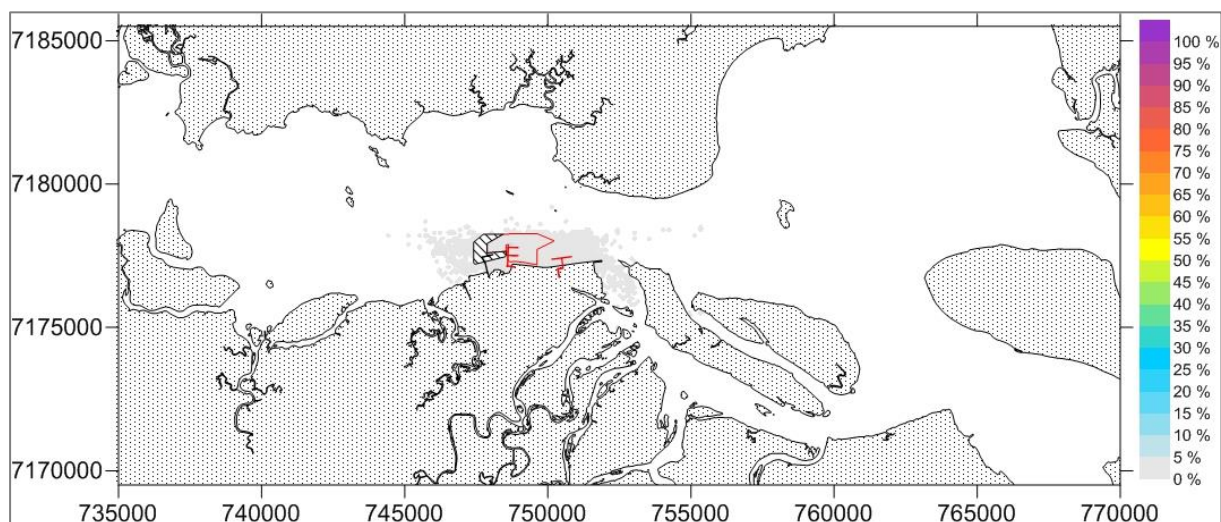
 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE	REV. PLANAVE	203
	RL-B00-H01-1001	0	

finos). Como nos cenários Drag-T, em ambos os cenários Drag-F, as probabilidades de que as concentrações de sedimentos finos em suspensão seja maior do que 20,0 mg/L não ultrapassa 5% (cerca de 17 dias); ainda, a ocorrência de maiores concentrações ocorre nas mesmas áreas dos cenários anteriores (margem sul da área de interesse e entrada do Canal da Cotinga), porém um pouco maiores para o caso do Píer F.

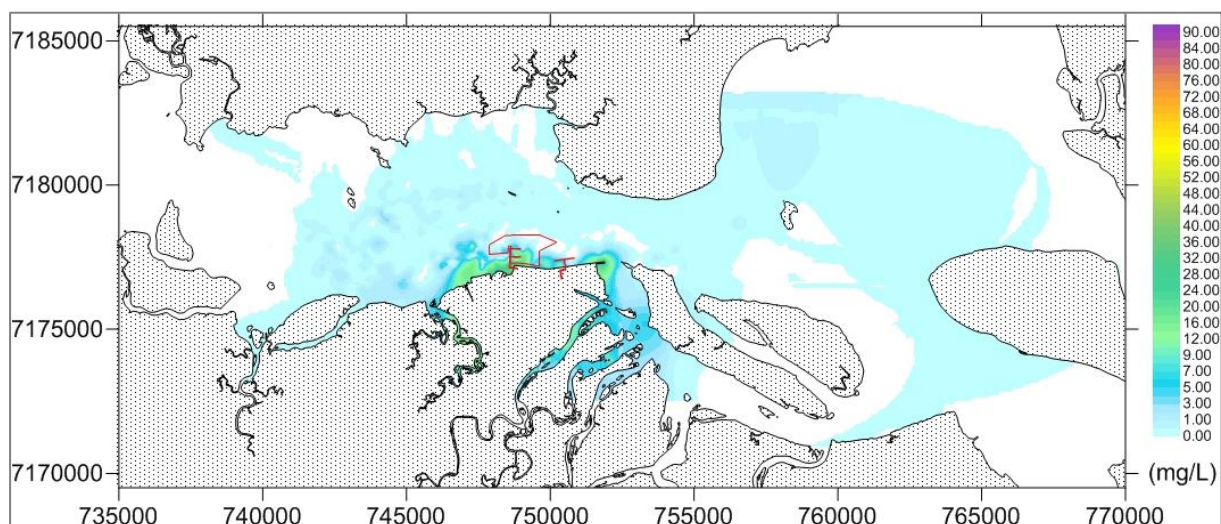
As isolinhas de concentração de sedimentos suspensos ao final do período de dragagem (Figura 238 e Figura 239) mostram concentrações máximas da ordem de 20 mg/L ao final do período de dragagem. As isolinhas de altura de sedimentação, ao final do período de dragagem, são apresentadas na Figura 240 e na Figura 241 – nos dois cenários as alturas de sedimentação não ultrapassam 0,1 cm em pequenas áreas localizadas dentro dos limites de dragagem relacionados ao Píer F. Alturas de sedimentação menores, no entanto, são observadas ao longo de uma grande área do estuário. As nuvens de partículas de sedimentos, ao final do período de dragagem, são apresentadas na Figura 242 e na Figura 243 – estas apresentam um comportamento semelhante ao dos cenários relacionados ao Píer T; novamente esse comportamento pode ser explicado pela dinâmica das correntes de maré dentro do estuário, o que inclui as variações de elevação da superfície livre, bem como das velocidades e direções de corrente.



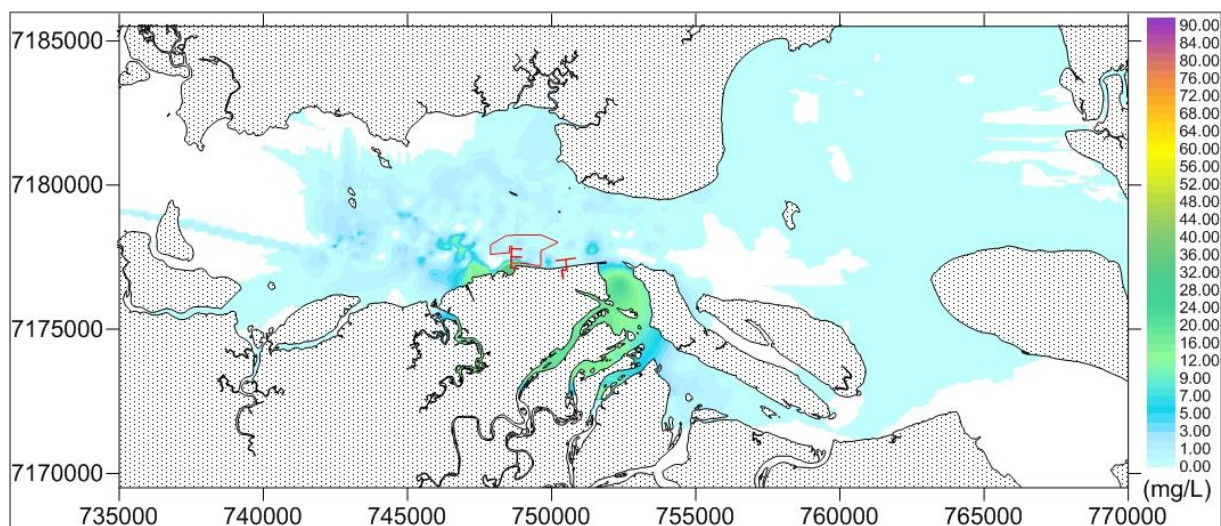
**Figura 236 – Isolinhas de probabilidade de ocorrência de concentração maior do que 20,0 mg/L – Cenário Drag-F – Verão.**



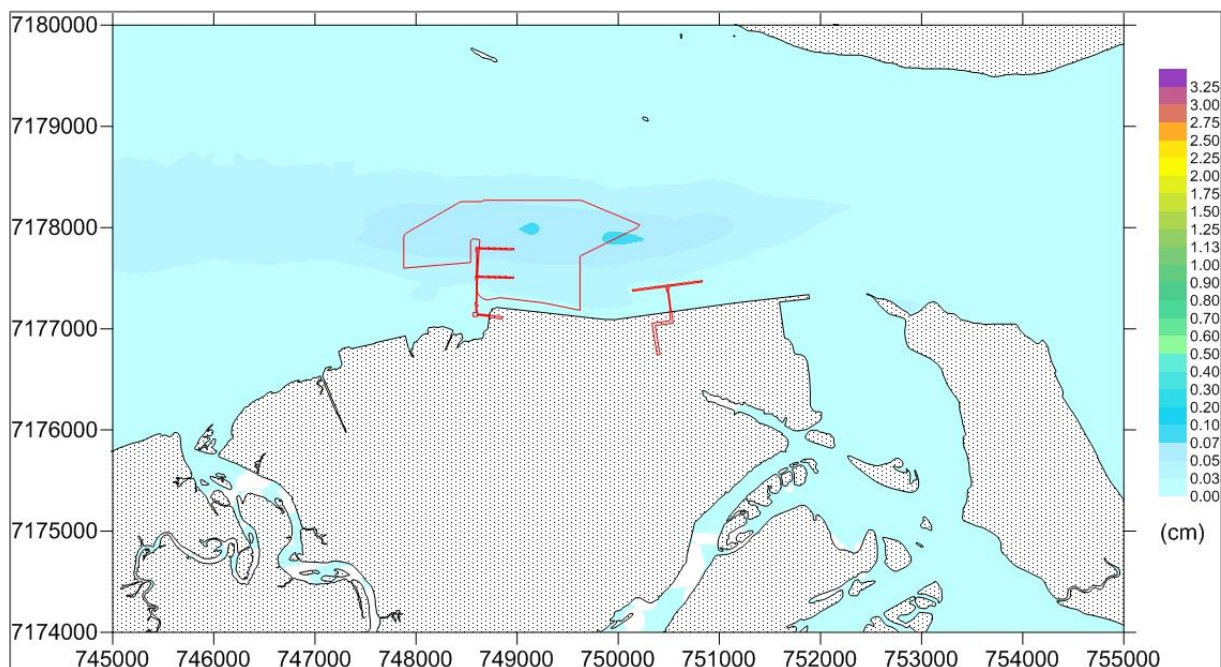
**Figura 237 – Isolinhas de probabilidade de ocorrência de concentração maior do que 20,0 mg/L – Cenário Drag-F – Inverno.**



**Figura 238 – Isolinhas de concentração de sedimentos suspensos ao final do período de dragagem – Cenário Drag-F – Verão.**

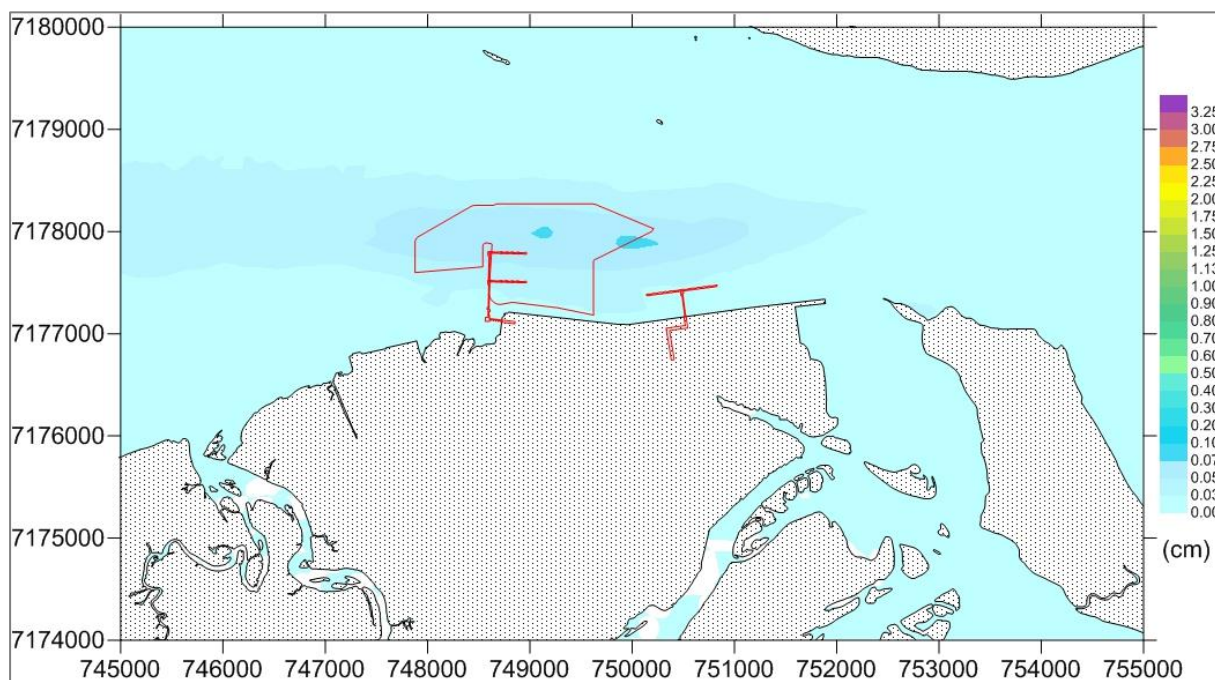


**Figura 239 – Isolinhas de concentração de sedimentos suspensos ao final do período de dragagem – Cenário Drag-F – Inverno.**

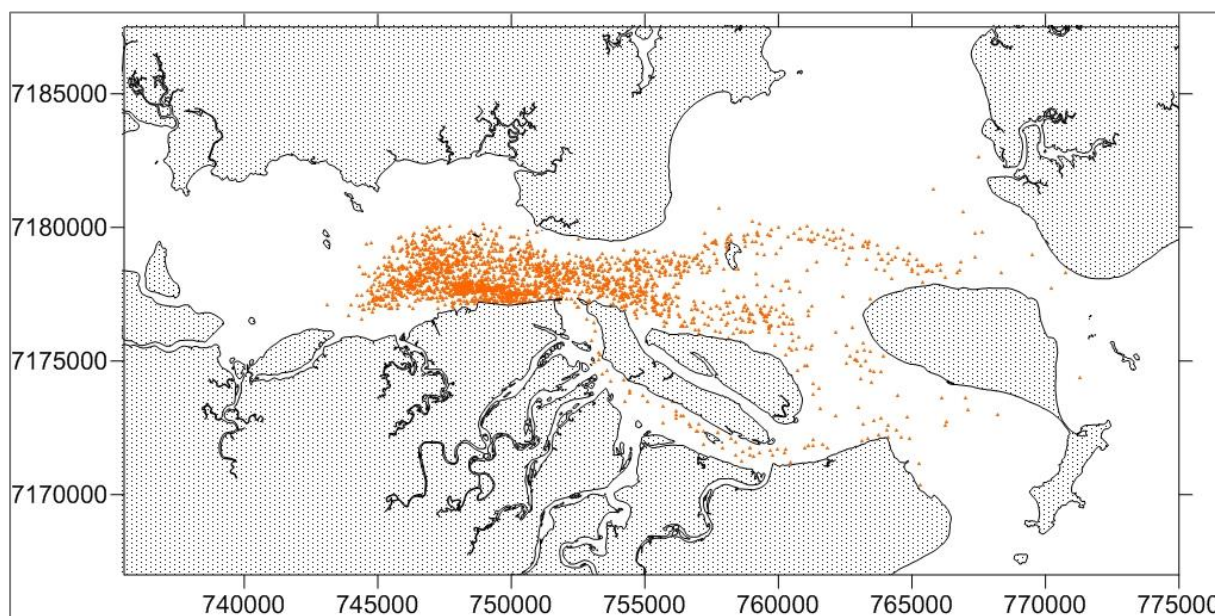


**Figura 240 – Isolinhas de altura de sedimentação ao final do período de dragagem – Cenário Drag-F – Verão.**

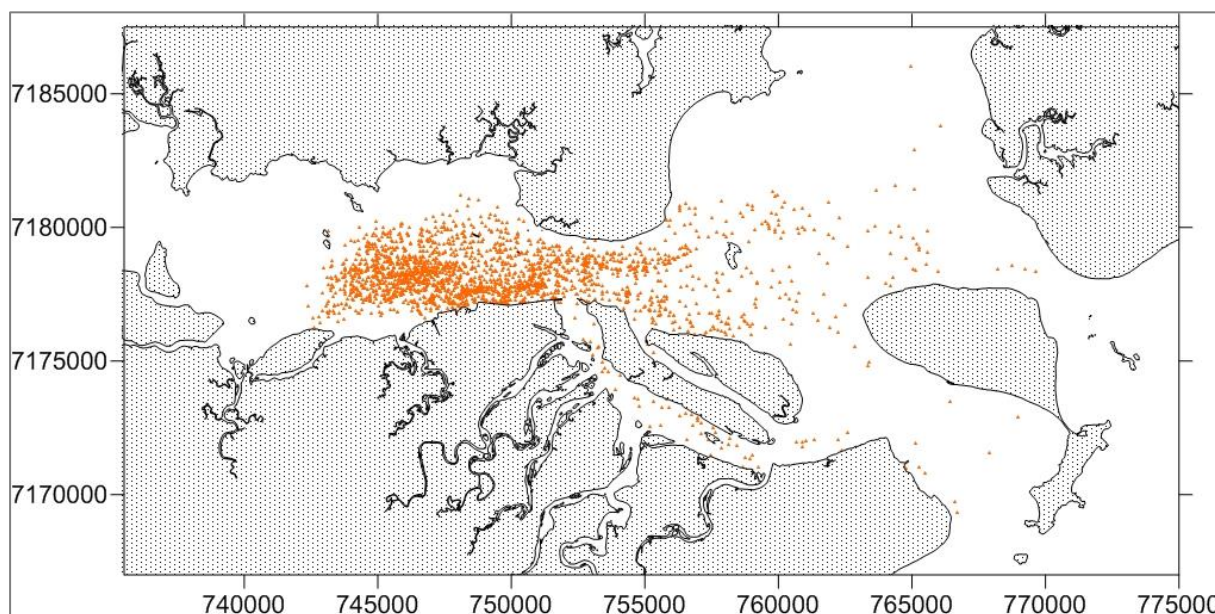




**Figura 241 – Isolinas de altura de sedimentação ao final do período de dragagem – Cenário Drag-F – Inverno.**



**Figura 242 – Nuvem de partículas suspensas ao final do período de dragagem – Cenário Drag-F – Verão.**



**Figura 243 – Nuvem de partículas suspensas ao final do período de dragagem – Cenário Drag-F – Inverno.**

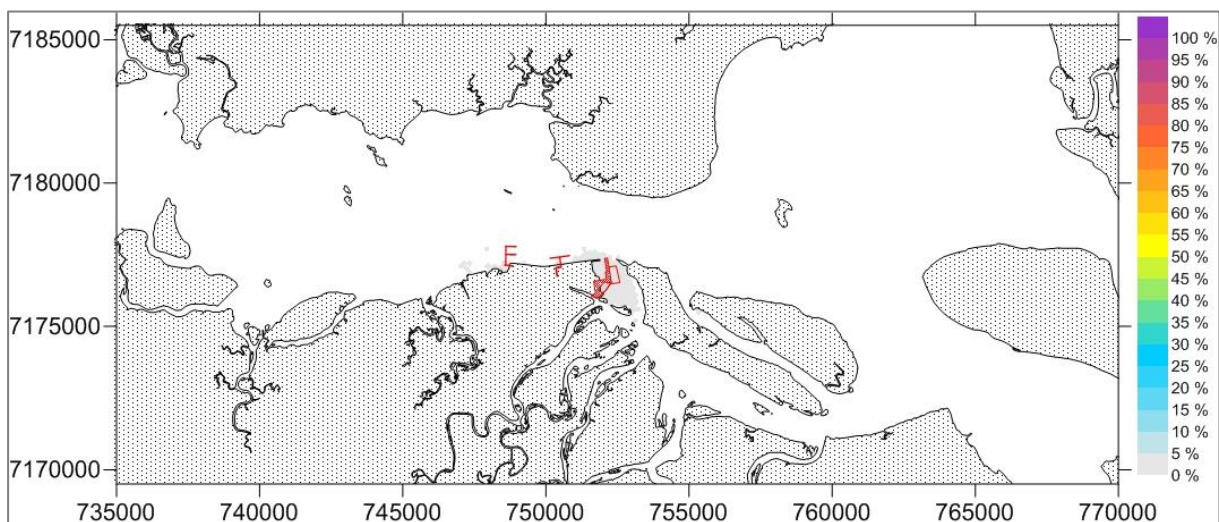
### 1.7.3 Resultados para o cenário Drag-CN

Os resultados das simulações das dragagens necessárias para implantação do Complexo Náutico, representadas nos cenários Drag-CN – Verão e Drag-CN – Inverno, são apresentadas abaixo. Os resultados são bastante semelhantes em ambos os cenários.

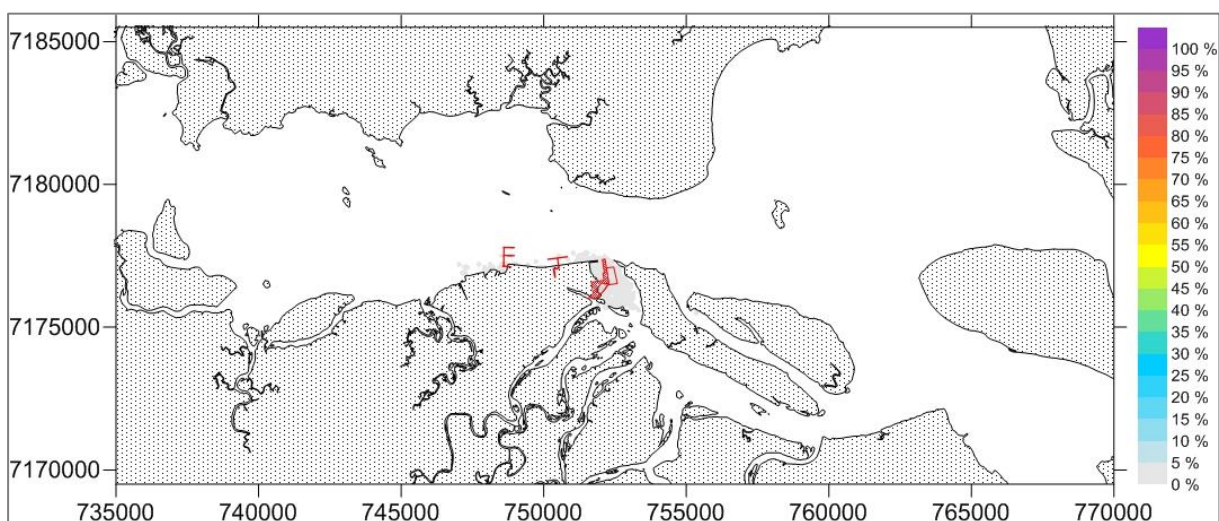
Para este caso, as probabilidades de ocorrência de concentrações de sedimentos suspensos serem maiores do que 20,0 mg/L são apresentadas na Figura 244 e na Figura 245 – estas foram obtidas considerando o período necessário para realização das dragagens (152 dias) mais um período de 30 dias, totalizando 182 dias de simulação. Novamente as probabilidades obtidas são da ordem de 5%, o que, nesses cenários, representa cerca de 9 dias, e se concentram na região da entrada do Canal da Cotinga podendo atingir parte da região dos píeres T e F.

A Figura 246 e a Figura 247 mostram as isolinhas de concentração de sedimentos suspensos ao final do período de dragagem. Observa-se que, na área de dragagem, as concentrações podem chegar a 90 mg/L (Inverno) – isso se explica pelo fato de que nessa área haverá a maior alteração de profundidade em função da dragagem, e conseqüentemente a quantidade de sedimentos que serão colocados em suspensão também será maior quando comparada aos outros empreendimentos. Em termos de altura de sedimentação (Figura 248 e Figura 249), observam-se valores de até 2,5 cm, os quais são muito maiores quando comparados às

alturas de sedimentação dos cenários anteriores. Para estes dois cenários, as nuvens de partículas de sedimentos para o período final de dragagem são apresentadas na Figura 250 e na Figura 251 – a menor quantidade de partículas suspensas pode ser explicada pelo menor número de fontes de dragagem, e principalmente pelas maiores alturas de sedimentação, ou seja, uma vez que as partículas se sedimentam no fundo, deixam de circular pelas águas do estuário.

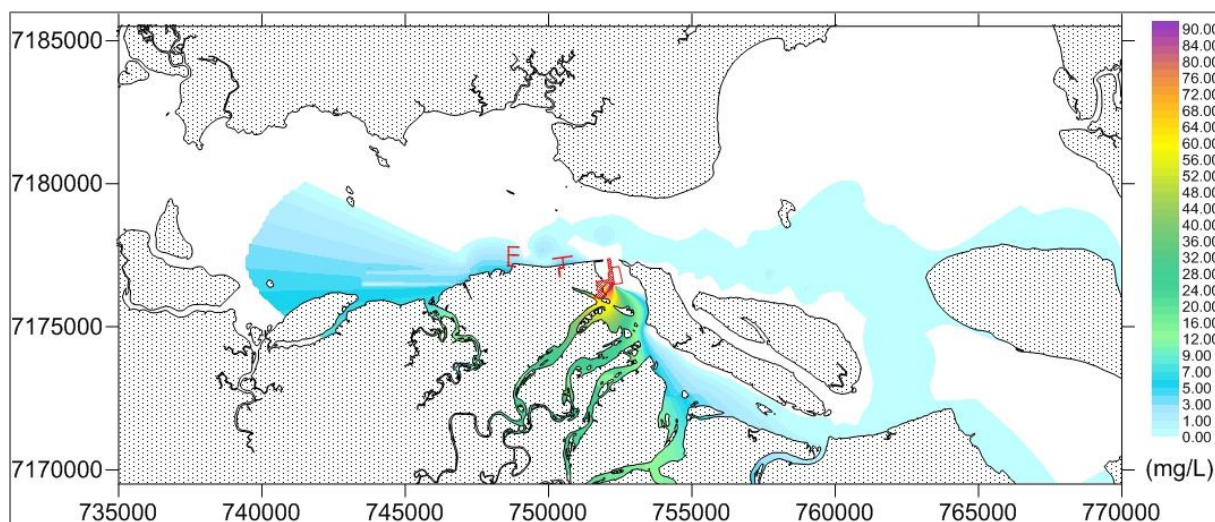


**Figura 244 – Isolinhas de probabilidade de ocorrência de concentração maior do que 20,0 mg/L – Cenário Drag- CN – Verão.**

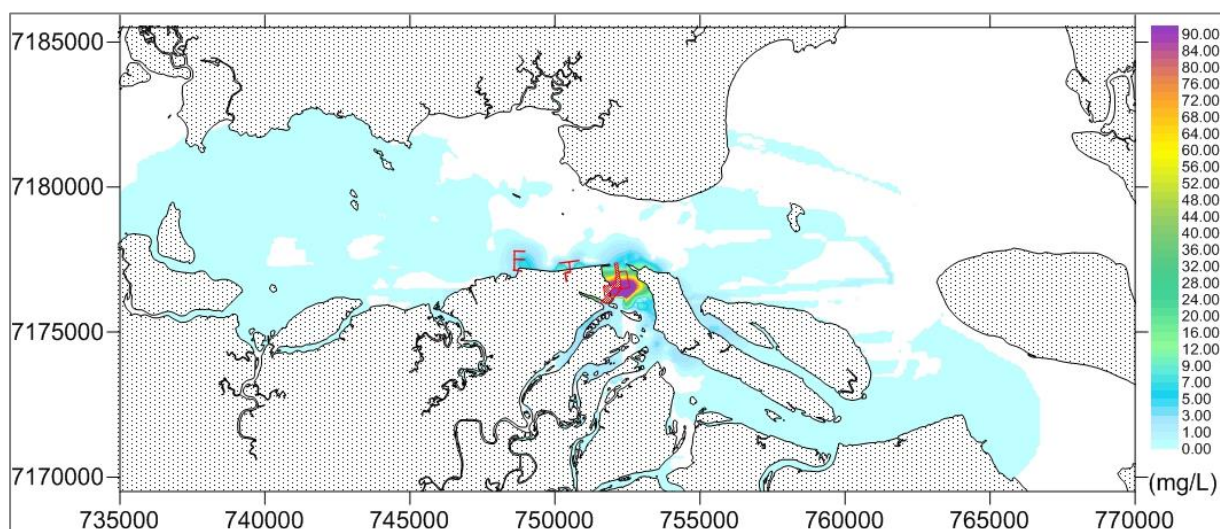


**Figura 245 – Isolinhas de probabilidade de ocorrência de concentração maior do que 20,0 mg/L – Cenário Drag- CN – Inverno.**

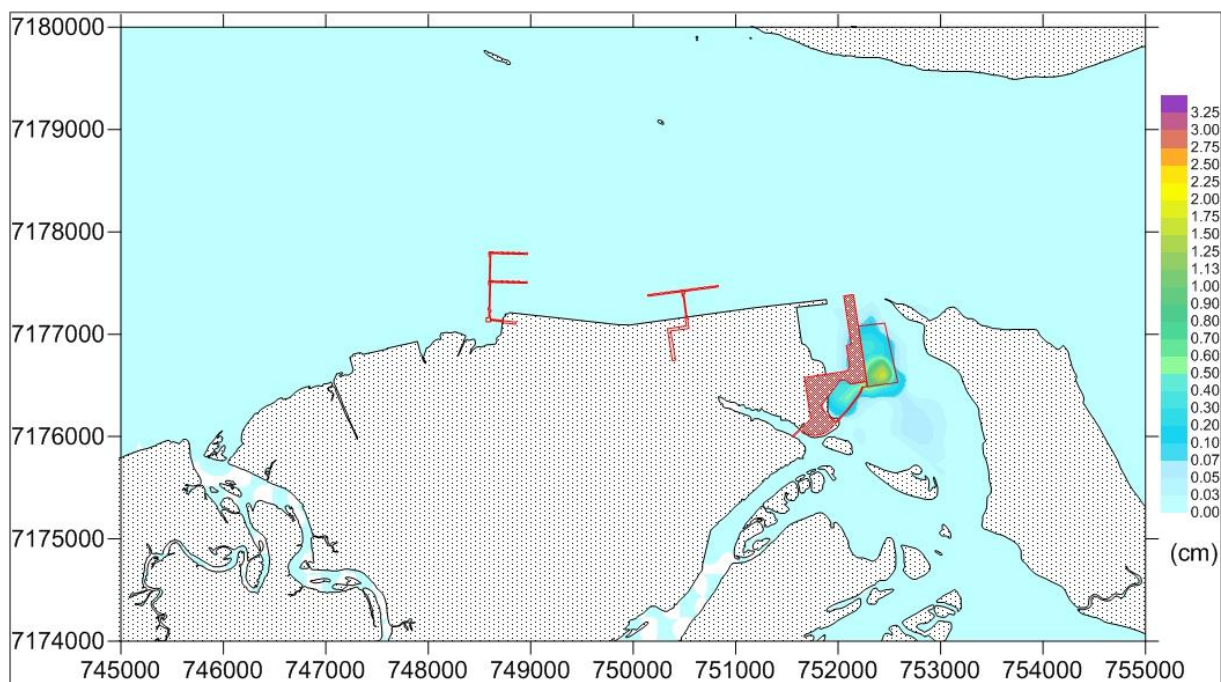




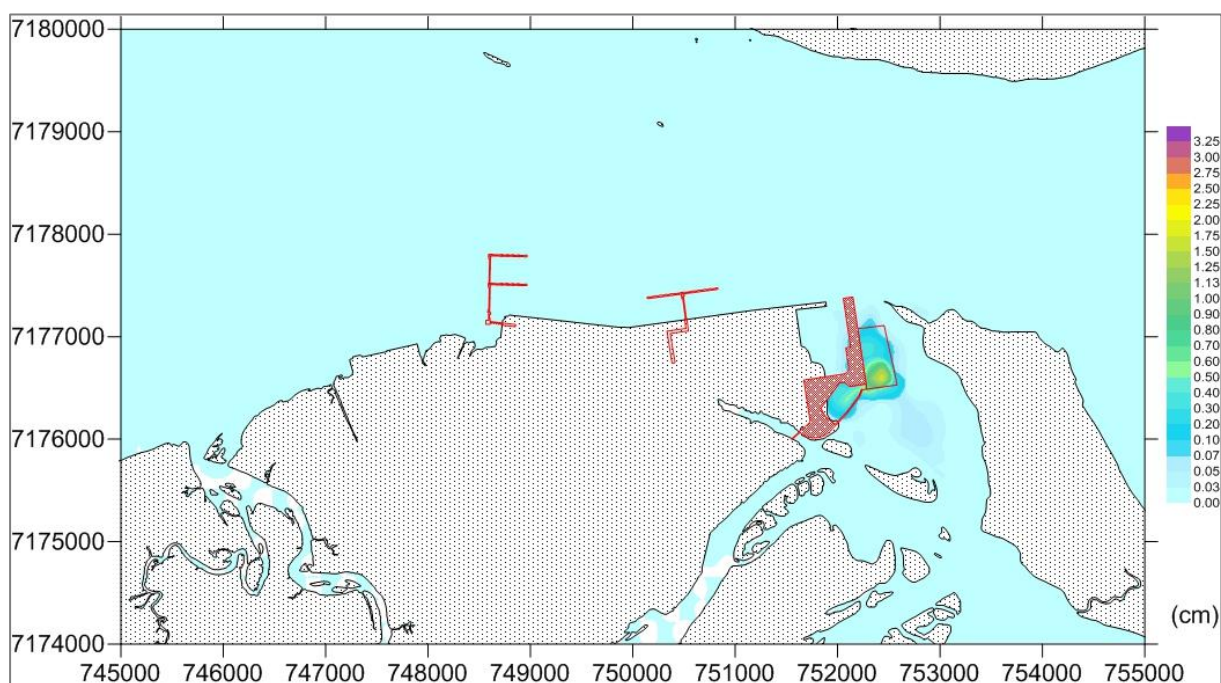
**Figura 246 – Isolinhas de concentração de sedimentos suspensos ao final do período de dragagem – Cenário Drag- CN – Verão.**



**Figura 247 – Isolinhas de concentração de sedimentos suspensos ao final do período de dragagem – Cenário Drag- CN – Inverno.**

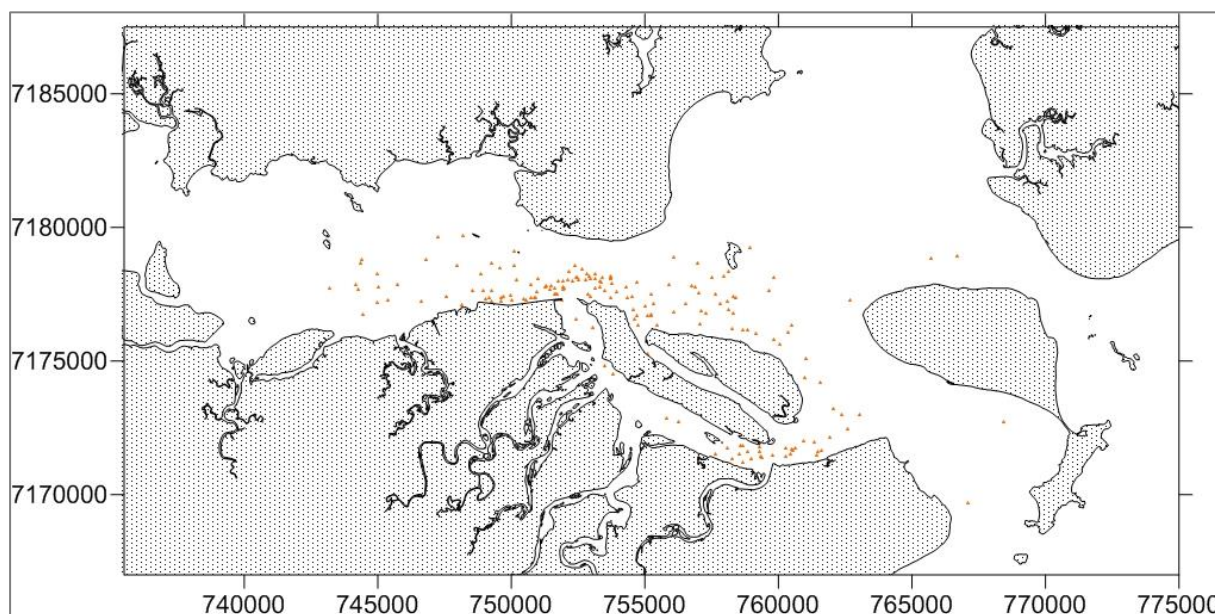


**Figura 248 – Isolinhas de altura de sedimentação ao final do período de dragagem – Cenário Drag-CN – Verão.**

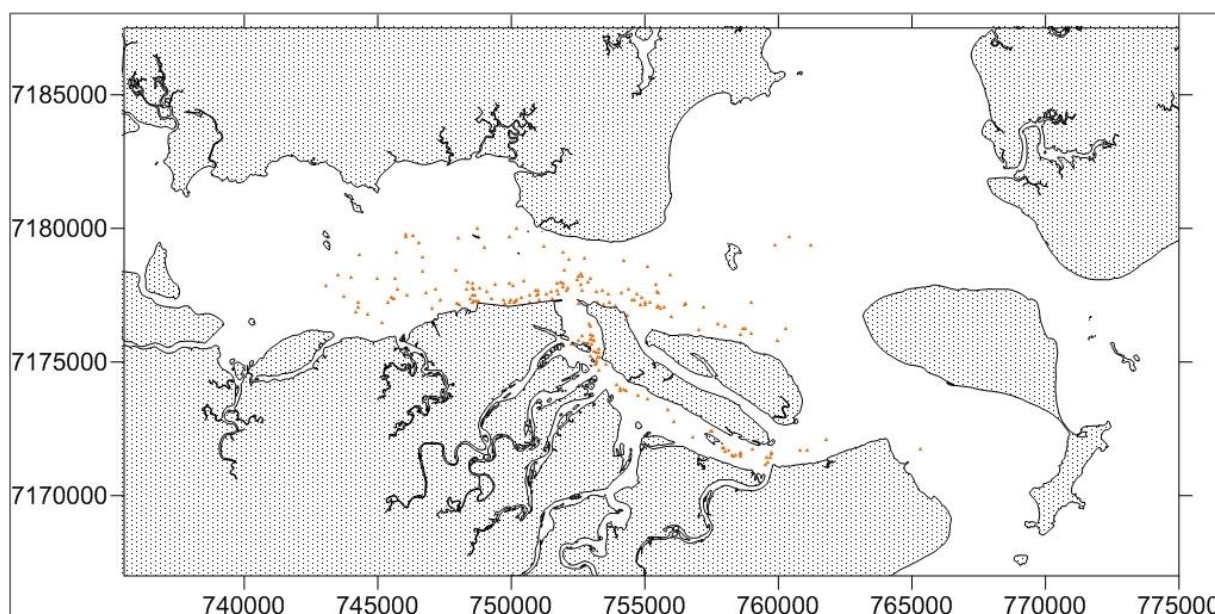


**Figura 249 – Isolinhas de altura de sedimentação ao final do período de dragagem – Cenário Drag-CN – Inverno.**





**Figura 250 – Nuvem de partículas suspensas ao final do período de dragagem – Cenário Drag-CN – Verão.**





**Figura 251 – Nuvem de partículas suspensas ao final do período de dragagem – Cenário Drag-CN – Inverno.**

#### 1.7.4 Resultados para o Cenários Drag-L

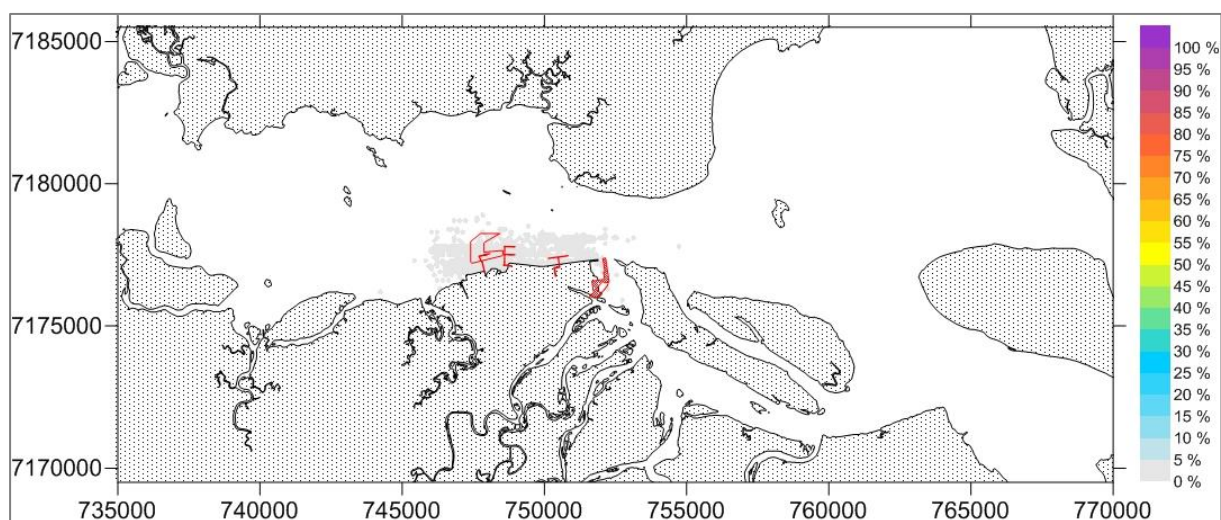
Como nos cenários anteriores, para os cenários Drag-L – Verão e Drag-L – Inverno, as probabilidades de ocorrência de concentração de sedimentos finos em suspensão ser maior do que 20,0 mg/L (Figura 252 e Figura 253) também não ultrapassa 5% do tempo, o que representa cerca de 8 dos 146 dias de simulação (116 dias de dragagem mais 30 dias pós-



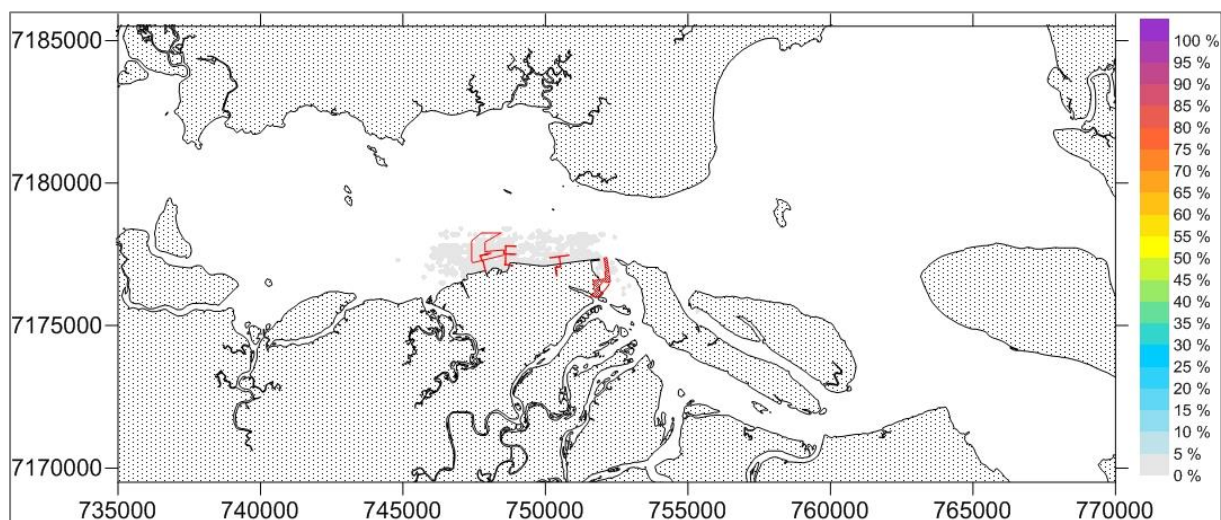
 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	212

dragagem); a distribuição espacial é semelhante nos cenários de Verão e Inverno, além disso, a área atingida é semelhante às áreas associadas aos píeres T e F.

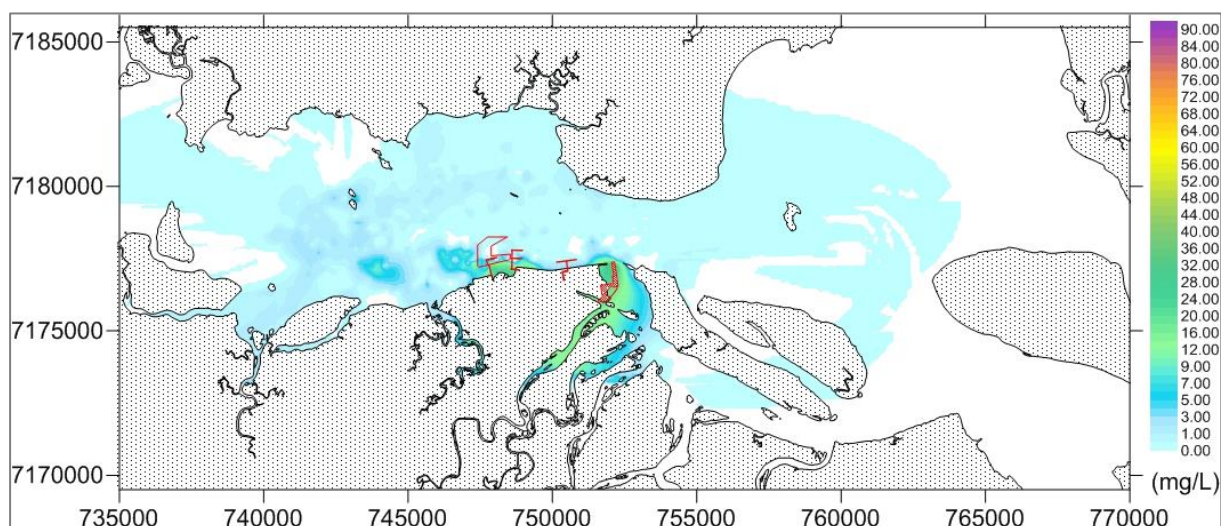
As isolinhas de concentração de sedimentos suspensos ao final do período de dragagem são apresentadas na Figura 254 e na Figura 255 – as concentrações máximas chegam a 40 mg/L e, além da área de dragagem relacionada ao Píer L, também é maior na região do Complexo Náutico – deve-se mencionar que nos cenários Drag-L considera-se que o Complexo Náutico já está construído, assim ele pode estar obstruindo a passagem dos sedimentos suspensos através do Canal da Cotinga. A Figura 256 e a Figura 257 mostram as alturas de sedimentação para os cenários de Verão e de Inverno; estas chegam a 0,3 cm em áreas próximas a estruturas já existentes, indicando que estruturas podem obstruir a passagem de sedimentos fazer com que eles se depositem próximo às bases das estruturas. As nuvens de partículas suspensas, apresentadas na Figura 258 e na Figura 259, em comparação com as situações anteriores, mostram um espalhamento maior das partículas para regiões mais internas da baía, porém a região impactada é próxima àquelas relacionadas aos píeres T e F.



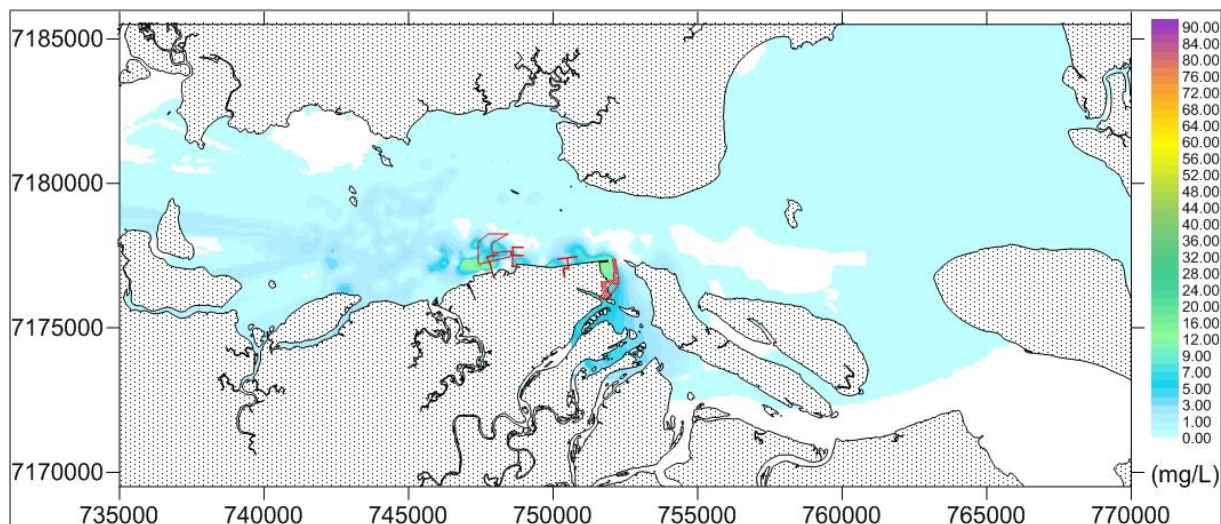
**Figura 252 – Isolinhas de probabilidade de ocorrência de concentração maior do que 20,0 mg/L – Cenário Drag-L – Verão.**



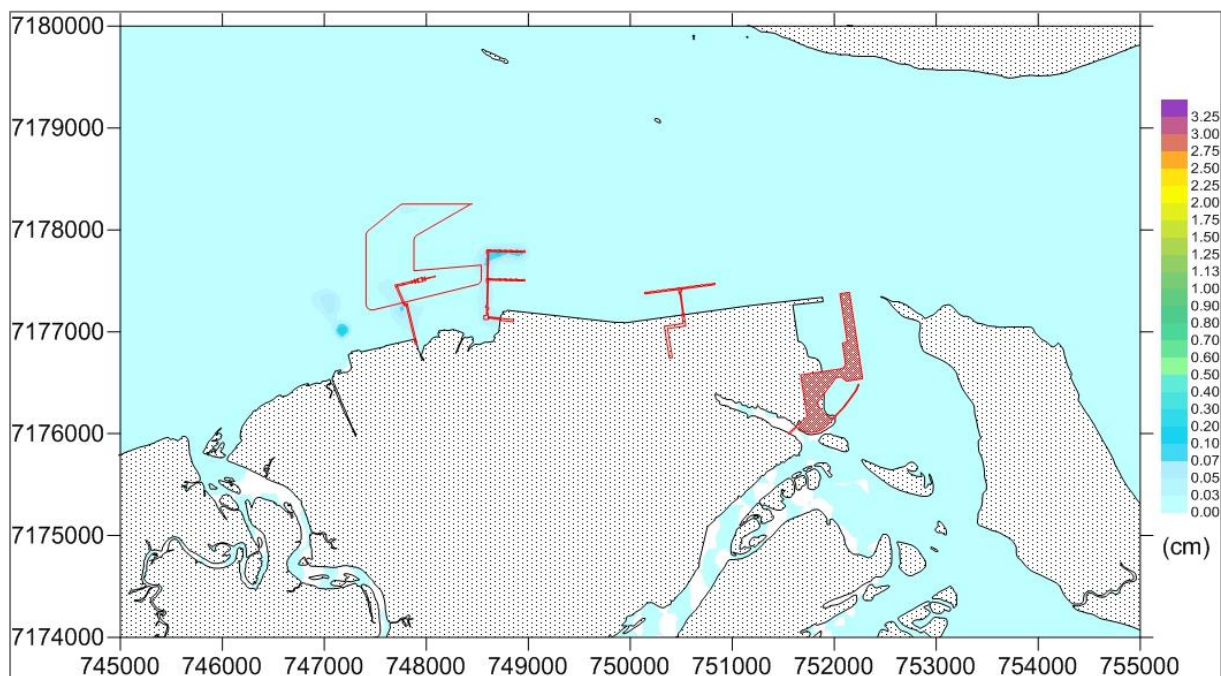
**Figura 253 – Isolinhas de probabilidade de ocorrência de concentração maior do que 20,0 mg/L – Cenário Drag-L – Inverno.**



**Figura 254 – Isolinhas de concentração de sedimentos suspensos ao final do período de dragagem – Cenário Drag-L – Verão.**

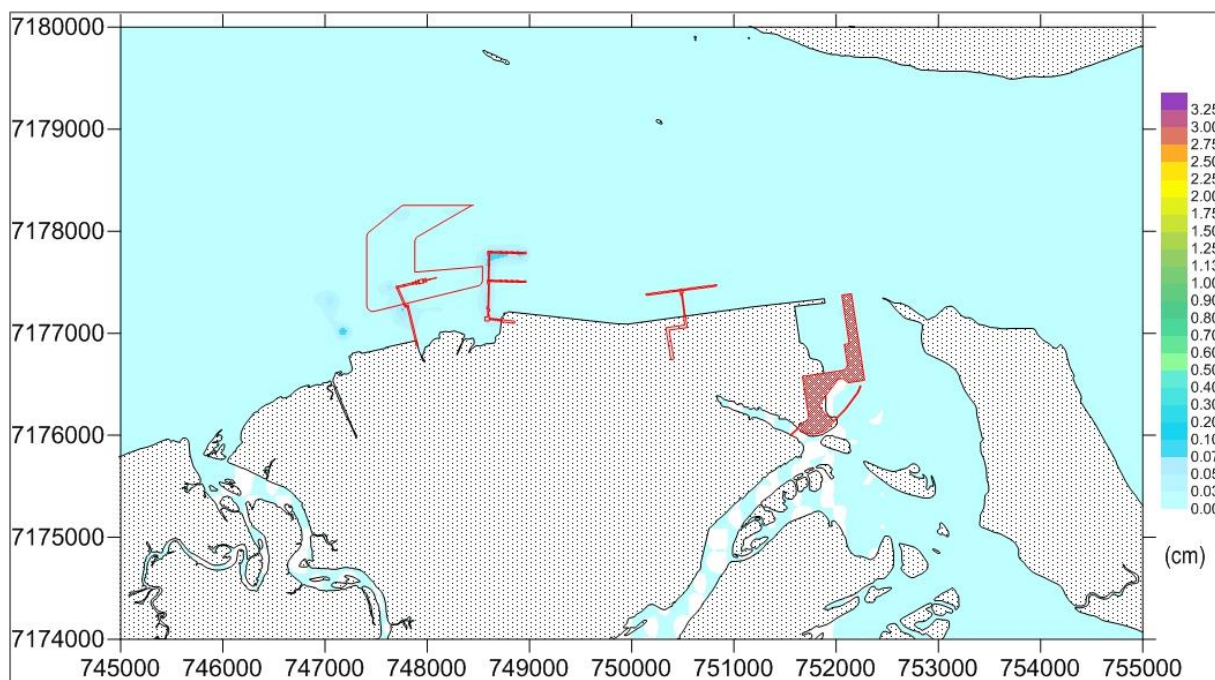


**Figura 255 – Isolinhas de concentração de sedimentos suspensos ao final do período de dragagem – Cenário Drag-L – Inverno.**

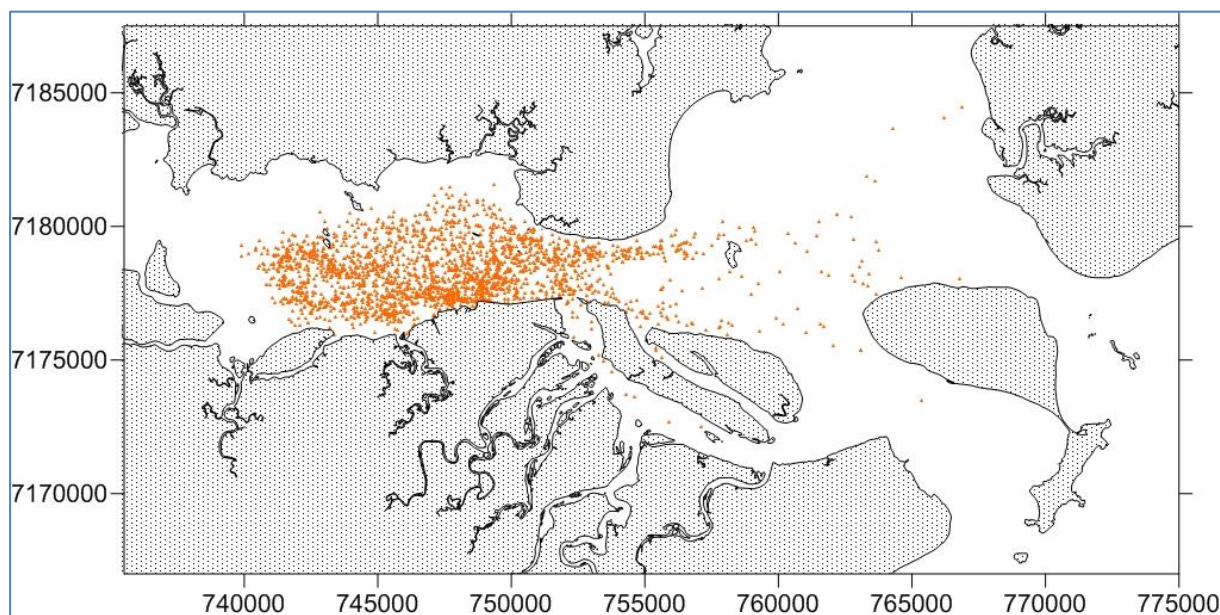


**Figura 256 – Isolinhas de altura de sedimentação ao final do período de dragagem – Cenário Drag-L – Verão.**

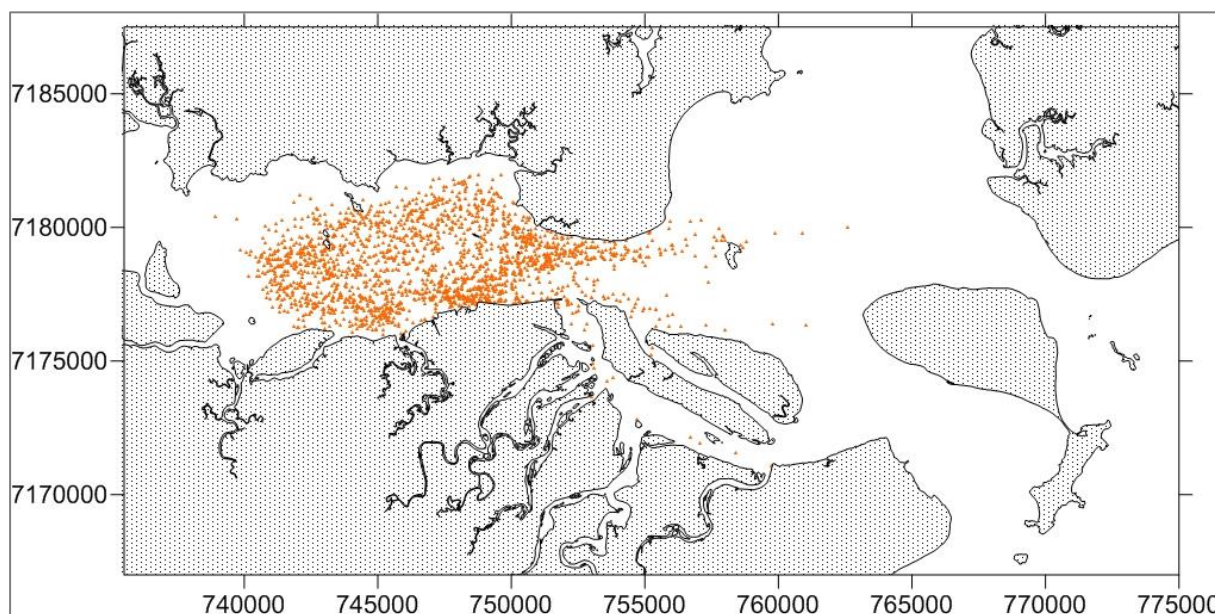




**Figura 257 – Isolinhas de altura de sedimentação ao final do período de dragagem – Cenário Drag-L – Inverno.**



**Figura 258 – Nuvem de partículas suspensas ao final do período de dragagem – Cenário Drag-L – Verão.**





**Figura 259 – Nuvem de partículas suspensas ao final do período de dragagem – Cenário Drag-L – Inverno.**

## 1.8 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas as simulações matemáticas da circulação hidrodinâmica, da evolução morfológica do fundo, do comportamento das ondas, e da dispersão de sedimentos durante a realização das dragagens necessárias para implantação dos empreendimentos relacionados a esse estudo – píeres T, F, L e Complexo Náutico 0 - na área do Porto de Paranaguá. Foram analisadas situações de diagnóstico e prognóstico de acordo com informações disponíveis na literatura, fornecidas pelo empreendedor, além de algumas levantadas para este estudo. As simulações foram realizadas considerando ciclos típicos de maré de verão e de inverno - de maneira geral, as diferenças observadas entre os dois ciclos foram pouco significativas, sendo mais evidentes em diferentes períodos do mesmo ciclo de maré (por exemplo, entre situações de vazante e enchente).

Em termos de alterações na hidrodinâmica, foram observadas mudanças de velocidade de corrente de até 0,4 m/s nas regiões que serão aprofundadas em função das dragagens. Em relação às mudanças do fundo e transporte de sedimentos, observam-se regiões em que poderá ocorrer redução e outras em que poderá ocorrer aumento do transporte de sedimento e, conseqüentemente, de erosão ou deposição; é importante destacar que este é processo cíclico e bastante dinâmico, ou seja, uma mesma região pode sofrer erosão num período e deposição em outro dependendo da direção e intensidade das correntes. Em relação às

 	Nº CLIENTE	REV. CLIENTE	FOLHA:
	Nº PLANAVE RL-B00-H01-1001	REV. PLANAVE 0	217

simulações de ondas, não foram observadas alterações significativas nos períodos e alturas significativas.

As simulações de dispersão de sedimentos finos durante as dragagens mostraram que poderá haver concentrações maiores do que 20,0 mg/L (com picos maiores do que 90,0 mg/L) em cerca de 5% do tempo simulado. As simulações foram realizadas sem considerar concentrações de background, isto é, concentrações de sedimentos finos já em suspensão na baía. Assim, as concentrações resultantes das simulações representam um acréscimo às concentrações atuais em função das dragagens. Nesse contexto, é importante que se monitore as atuais concentrações de sedimentos em suspensão de forma a permitir, durante o desenvolvimento dos trabalhos de dragagem, a definição do seu real impacto. De acordo com os resultados, as partículas de sedimentos finos se espalham por uma grande área do estuário; desta forma, ressalta-se mais uma vez a necessidade do monitoramento antes, durante e após as dragagens.

Ainda nesse contexto, um aspecto importante que deve ser considerado é em relação à evolução da linha de costa do estuário. Para que se possa avaliar, de fato, como a linha de costa evolui, é necessário conhecer, em detalhes, sua forma bem como a batimetria do fundo da baía e, principalmente, de suas margens, além de níveis de elevação de maré, intensidades e direções de corrente. Ainda, para que se avalie essa evolução, são necessárias informações em diferentes períodos de tempo – incluindo passado (se existentes), presente e futuro. Assim, recomenda-se o início do monitoramento e levantamento dessas informações antes do início da implantação dos empreendimentos.

Por fim, deve-se mencionar que a modelagem matemática não é uma ciência exata, sendo realizadas simplificações, com imprecisões em função da discretização da região de estudo, e incertezas nas condições de contorno e nos dados utilizados. Os resultados obtidos permitem analisar os processos dominantes e fornecem informações sobre a ordem de grandeza dos parâmetros de interesse; dessa forma, os resultados apresentados aqui devem ser encarados como aproximações qualitativas.