

Estudo de Dispersão de Sedimentos na Dragagem em Porto de Açu



**RELATÓRIO C080803 – REVISÃO 2
RELATÓRIO FINAL**

Outubro de 2008

ÍNDICE

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introdução e Objetivo..... | 1 |
| 2 | Teoria do Modelo Computacional | 1 |
| 2.1 | Introdução | 1 |
| 2.2 | Considerações Gerais | 2 |
| 2.3 | Equações Governantes..... | 5 |
| 2.4 | Condições de Contorno..... | 7 |
| 3 | Caracterização Oceanográfica | 7 |
| 3.1 | Maré..... | 8 |
| 3.2 | Batimetria..... | 10 |
| 4 | Modelagem do Transporte de Sedimentos | 13 |
| 4.1 | Modelagem Hidrodinâmica | 13 |
| 4.1.1 | Dados de Entrada..... | 14 |
| 4.1.2 | Resultados do Modelo Hidrodinâmico | 20 |
| 4.2 | Validação do modelo com os dados coletados..... | 25 |
| 4.2.1 | Análise dos ventos | 25 |
| 4.2.2 | Análise da maré | 28 |
| 4.2.3 | Análise das correntes | 31 |
| 4.2.4 | Conclusão..... | 35 |
| 4.3 | Modelagem de Dispersão de Sedimentos..... | 36 |
| 4.3.1 | Considerações sobre a Modelagem Computacional..... | 36 |
| 4.3.2 | Resultados do Modelo de Transporte | 39 |
| 4.3.3 | Conclusões | 50 |
| 5 | Referências Bibliográficas..... | 51 |

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO

Este relatório tem por objetivo a análise da dispersão dos sedimentos em suspensão na coluna d'água gerados durante a dragagem realizada em nova jazida de areia próxima ao Porto do Açú. Prevê-se uma captação de 4,0 milhões de metros cúbicos de sedimentos que serão utilizados para o aterro de áreas do referido porto.

Na análise, foram utilizados como ferramenta os modelos computacionais de hidrodinâmica e de transporte Lagrangeano. Na parte hidrodinâmica foram simuladas as entradas e saídas de maré no sistema envolvendo ciclo de sizígia e quadratura, com o intuito de se obter os níveis d'água e as velocidades das correntes. O modelo de transporte Lagrangeano simulou a dispersão de sedimentos na operação de dragagem do material da jazida de areia.

Descrevem-se a seguir a teoria do modelo computacional e os dados utilizados.

2 TEORIA DO MODELO COMPUTACIONAL

2.1 Introdução

A aplicação da modelagem numérica para a determinação da circulação em corpos d'água costeiros justifica-se pelo fato de determinar o padrão de circulação em todo o corpo d'água além de permitir a previsão das alterações na circulação da água devido à introdução de obras. Para o diagnóstico do padrão de circulação em todo o corpo d'água seria necessária a medição da intensidade de corrente durante vários ciclos de maré em diversos pontos no interior do corpo d'água exigindo uma equipe de campo muito grande e diversos equipamentos, sendo portanto este método, caro e demorado. Com a utilização do modelo, basta a medição de corrente em alguns poucos pontos no corpo d'água para a sua calibração.

Modelos que possam descrever apropriadamente a hidrodinâmica em sistemas aquáticos são ferramentas poderosas, tanto no que se refere à sua contribuição na avaliação de impactos

ambientais como na definição de estratégias para gerenciamento de corpos d'água. O conhecimento do padrão de circulação de um corpo d'água é portanto fundamental para diversos estudos ambientais. Temos, por exemplo, estudos de qualidade de água devido ao lançamento de poluentes no mar, em sistemas lagunares; bem como estudos de determinação de níveis de cheias e possibilidade de assoreamento em embocadura.

2.2 Considerações Gerais

A modelagem computacional da hidrodinâmica na região de Barra do Açu foi realizada através do SisBAHIA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental). Trata-se de um sistema profissional em ambiente Windows, registrado pela Fundação Coppetec, (órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa da COPPE/UFRJ), que se encontra continuamente em ampliação de capacidade de simulação e aperfeiçoamento pela COPPE/UFRJ desde 1987, através de várias teses de mestrado e doutorado, além de projetos de pesquisa. O sistema tem sido adotado em dezenas de estudos e projetos envolvendo modelagem de corpos de água naturais (para maiores detalhes sobre o SisBAHIA consulte Rosman (2001) ou www.sisbahia.coppe.ufrj.br). Foram utilizados os seguintes modelos do SisBAHIA:

- Modelo Hidrodinâmico: é um modelo de circulação hidrodinâmica 3D/2DH, otimizado para corpos de água naturais nos quais efeitos baroclínicos sejam pouco importantes. Resultados podem ser tanto 3D quanto 2DH, dependendo dos dados de entrada. “Otimizado” é usado no sentido de um modelo planejado para ótima representação de escoamentos em domínios naturais com geometria complexa. Processos de calibração são minimizados devido a: discretização espacial via elementos finitos quadráticos e transformação σ , permitindo ótimo mapeamento de corpos de água com linhas de costa e batimetrias complexas, campos de vento e atrito do fundo podendo variar dinamicamente no tempo e no espaço, e modelagem de turbulência multi-escala baseada em Simulação de Grandes Vórtices (*Large Eddy Simulation*).

- Modelo de Transporte Lagrangeano: é um modelo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, em camadas selecionadas de escoamentos 3D ou 2DH. Com este modelo simula-se o transporte de escalares, tais como substâncias dissolvidas ou em suspensão, ou parâmetros de qualidade da água, que possam estar bem misturados, ocupando apenas uma camada, ou flutuando na coluna d'água. Esse tipo de modelo é, na maioria das vezes, utilizado no estudo do transporte, relativamente local, de plumas ou nuvens de contaminantes originados a partir de fontes de pequena escala em relação ao domínio do modelo hidrodinâmico.

Para obtenção do padrão de circulação em Barra do Açu selecionou-se a opção de descrição bidimensional na horizontal do escoamento, também chamada 2DH, do modelo hidrodinâmico SisBAHIA. Tal opção se faz possível devido ao fato do escoamento na região ser predominantemente horizontal e não haver variação significativa de seus parâmetros (velocidade das correntes, densidade da água), ao longo da coluna d'água.

O modelo hidrodinâmico determina em cada ponto, (x, y) , do corpo d'água, os valores médios na vertical das componentes nas direções x e y , da velocidade de corrente, $u(x, y, t)$ e $v(x, y, t)$, e a elevação do nível d'água, ou posição da superfície livre, $z = \eta(x, y, t)$.

O modelo matemático empregado tem como equações governantes a equação da continuidade e as equações da conservação da quantidade de movimento nas direções x e y . A rigor, o campo de velocidades é governado pelas equações de Navier-Stokes para escoamentos turbulentos (também conhecidas como equações de Reynolds) em três dimensões (3D). Do ponto de vista prático, estas equações são promediadas na vertical, resultando em um sistema de equações bidimensionais em planta, conhecidas como equações de águas rasas. Estes escoamentos ocorrem normalmente em baías, estuários, lagos e águas costeiras (chamados corpos de águas rasos). O modelo resultante, bidimensional na horizontal (2DH), é aplicável em casos em que as escalas verticais de movimento são sensivelmente inferiores às escalas horizontais, e onde o efeito de estratificação é desprezível sendo a coluna d'água considerada bem misturada. Quando as três dimensões são significativas e/ou a estratificação acentuada, utilizam-se modelos bidimensionais em camadas. Modelos tridimensionais são empregados somente em situações específicas, devido aos elevados requisitos computacionais.

Os valores médios na vertical da velocidade da corrente são definidos por:

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

onde: u = componente da velocidade na direção x

v = componente da velocidade na direção y

h = contorno do fundo

η = superfície livre

A Figura 2-1 exhibe as grandezas consideradas e os perfis de velocidade real e promediadas na vertical.

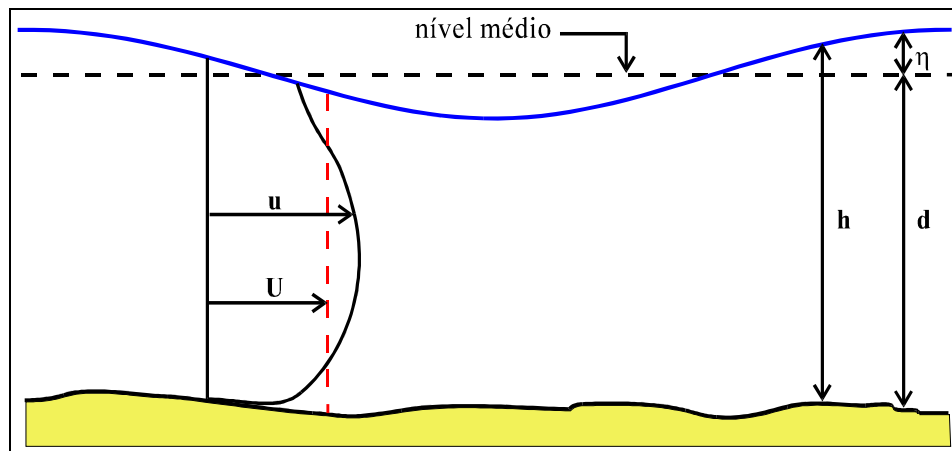


Figura 2-1: Grandezas físicas consideradas

2.3 Equações Governantes

Considerando as hipóteses de incompressibilidade, aproximação de Boussinesq, aproximação hidrostática e introduzindo o conceito de "*velocidade média ao longo da profundidade*" apresentado, é possível derivar o seguinte sistema de equações:

Equação da Conservação da Massa, ou Continuidade:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial U d}{\partial x} + \frac{\partial V d}{\partial y} = 0$$

Equação de Momentum, ou Conservação de Quantidade de Movimento, na direção x_i

$$\frac{\partial U_i d}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (d U_i U_j) = -g d \frac{\partial \eta}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (d \tau_{ij}) + \tau_i^s - \tau_i^f \right] + f^i (1 - \delta_{ij}) U_j d$$

Nas equações anteriores η é a elevação do nível da água, d é a profundidade total ($d = \eta + h$), h é a profundidade média

O termo f é o coeficiente de Coriolis, $f = 2\Omega \sin \theta$, Ω a velocidade de rotação da Terra, θ a latitude do local considerado (positivo no hemisfério Norte e negativo no Sul).

Os termos τ_i^s e τ_i^f são os termos de atrito na superfície e no fundo, respectivamente, sendo parametrizados da forma:

$$\tau_i^S = \rho_{ar} C_D U_{10}^2 \cos \alpha_i$$

$$\tau_i^F = \rho C_f (u^2 + v^2)^{1/2} u_i$$

onde ρ_{ar} é a densidade do ar, U_{10} a velocidade do vento a dez metros da superfície da água, C_D o coeficiente de arraste do vento na superfície livre, Wu J. (1982), α_i o ângulo que o vento faz com a direção i , e C_f o coeficiente de atrito no fundo. C_f pode ser obtido via coeficiente de Chezy (C), como segue:

$$C_f = \frac{g}{C^2}; \quad \text{considerando } C = 18 \log \left(\frac{6H}{\varepsilon} \right)$$

sendo ε a amplitude da rugosidade equivalente do fundo; Abbot e Basco, (1989).

As tensões turbulentas laterais médias na vertical, τ_{ij} , são fundamentais para a obtenção de modelos com boa capacidade de previsão. No caso presente, são modeladas do seguinte modo:

$$\tau_{ij} = (K_{Hf} + K_V) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\Lambda^2}{24} \left(\left| \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right| \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \left| \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right| \right)$$

K_{Hf} é o coeficiente horizontal de difusão turbulenta de momentum; K_V é um coeficiente de dispersão de momentum que aparece devido à promediação na dimensão vertical. Λ é um parâmetro relativo à largura do filtro utilizado na filtragem (promediação) da turbulência, Rosman e Gobbi (1990).

2.4 Condições de Contorno

Definido o domínio de estudo, deve-se então especificar as condições de contorno do modelo, ou seja, as características do escoamento nas fronteiras entre a área modelada e a região externa a ela.

Nas fronteiras de terra sabe-se que não há fluxo de massas d'água perpendicularmente ao contorno, pois este é impermeável. Nestes casos então se especifica como condição de contorno que as velocidades perpendiculares à fronteira sejam nulas, com exceção das afluições fluviais onde se especifica a vazão. Porém, nos limites do modelo em que o lado do contorno é água, denominada fronteira aberta, o fluxo não é nulo. Usualmente especifica-se nas fronteiras abertas as velocidades de corrente ou a posição da superfície da água. Quando o contorno aberto representa o encontro de um rio com o domínio de estudo, costuma-se especificar as velocidades perpendiculares como condição de contorno, pois o escoamento nos rios é aproximadamente unidimensional e esta é uma informação relativamente simples de ser obtida. No caso em apreço foram fornecidas as variações de maré no contorno aberto e a vazão fluvial do rio Paraíba do Sul.

3 CARACTERIZAÇÃO OCEANOGRÁFICA

O diagnóstico da região em estudo foi baseado em dados da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e no volume 13 do “Levantamento do Estado da Arte da Pesquisa dos Recursos Vivos Marinhos do Brasil” (FEMAR, 1996), que trata da oceanografia física do programa REVIZEE. O objetivo deste programa é avaliar o potencial sustentável dos recursos vivos na Zona Econômica Exclusiva (ZEE); assim, foram levantadas informações disponíveis para a caracterização dos recursos pesqueiros e do ambiente marinho, de onde se inclui a oceanografia física da costa brasileira. No presente diagnóstico, foram analisados os dados referentes à maré e batimetria local.

De acordo com o relatório da FEMAR (1996), os levantamentos oceanográficos na costa brasileira com ênfase nos aspectos físicos foram efetivamente iniciados em 1957, embora já houvesse registros de navios de pesquisa estrangeiros em 1911, 1925 e 1926. Nas décadas de 60, 70, 80 e 90 prosseguiram os levantamentos oceanográficos sistemáticos sazonais na costa do Brasil, havendo participação, além da marinha do Brasil, de navios estrangeiros e universidades.

Para o presente estudo, foram utilizados dados da área que abrange a região delimitada do cabo de São Tomé à Salvador, incluindo a ilha de Trindade, entre os paralelos de 12° S a 24° S e os meridianos de 043° W a 026° W.

O presente relatório contou, ainda, com dados de maré medidos *in loco* durante o período de março de 2007 a junho de 2008 em estação localizada na praia de Açú. Estes dados serão melhor descritos no item 4.2.2.

3.1 Maré

A maré no litoral Norte Fluminense é semi-diurna, isto é, ocorrem duas preamares e duas baixa-mares ao longo de um dia. Para a análise dos níveis de maré, foram utilizados dados do Terminal Marítimo de Imbetiba, no estado do Rio de Janeiro, fornecidas pelo Departamento de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN), cujas coordenadas são de 22° 23'S e 41° 46'W e cujo nível médio é de 0,72 m. A Tabela 3-1 exhibe os máximos e mínimos previstos para o ano de 2006, ressaltando que foi considerada apenas a maré astronômica, ou seja, dados que podem ser previstos com certeza; não foi considerada a influência da maré meteorológica no nível do mar. Também são mostrados na Tabela 3-1 as alturas de marés máximas de sizígia e as mínimas de quadratura, que correspondem às maiores diferenças consecutivas nos níveis do mar na sizígia e menores na quadratura, que não necessariamente correspondem à simples diferença entre o nível máximo e mínimo da maré naquele mês.

Os níveis máximos mensais alcançam valores de 1,3 a 1,5 m, ao passo que os níveis mínimos variam de -0,3 a 0,2 m. Para 2006, a altura de maré astronômica máxima de sizígia é prevista

para os meses de fevereiro, março, setembro e outubro, alcançado 1,6 m. Em relação a mínimos, na quadratura são previstos valores de 0,3 a 0,0 m, ou seja, variação nula de maré.

A Figura 3-1 apresenta a evolução temporal da maré, que foi gerada através da utilização das constantes harmônicas da Estação Maregráfica do Cabo de São Tomé, localizada em frente ao Farol de São Tomé, nas coordenadas de 22°07'S e 41°03' W (FEMAR, 2000). O nível médio do mar no local é de 0,67 m DHN. Apesar da curva da evolução não representar necessariamente um mês específico, percebe-se que os dados são condizentes com os níveis máximos e mínimos previstos na Tabela 3-1. Para o mês de janeiro, por exemplo, são previstos pela tábua de marés da Marinha, níveis máximos e mínimos de 1,3 e -0,2 m, respectivamente, bem similares aos níveis da maré de sizígia apresentados na curva de evolução.

Tabela 3-1 - Níveis máximos e mínimos das marés mensais e alturas máximas e mínimas de maré para o porto de Imbetiba em 2006.

| Mês de 2006 | Nível máximo da maré (m) | Nível mínimo da maré (m) | Altura máxima de maré de sizígia(m) | Altura mínima de maré de quadratura (m) |
|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|--|
| janeiro | 1,3 | -0,2 | 1,5 | 0,3 |
| fevereiro | 1,4 | -0,2 | 1,6 | 0,1 |
| março | 1,5 | -0,1 | 1,6 | 0,1 |
| abril | 1,5 | 0,1 | 1,3 | 0,1 |
| maio | 1,5 | 0,2 | 1,2 | 0,2 |
| junho | 1,4 | 0,2 | 1,2 | 0,3 |
| julho | 1,4 | 0,0 | 1,4 | 0,3 |
| agosto | 1,4 | -0,2 | 1,5 | 0,0 |
| setembro | 1,3 | -0,3 | 1,6 | 0,0 |
| outubro | 1,3 | -0,3 | 1,6 | 0,0 |
| novembro | 1,3 | -0,1 | 1,4 | 0,2 |
| dezembro | 1,3 | 0,0 | 1,2 | 0,3 |

Fonte: tábua das marés para 2006 – DHN - Marinha do Brasil.

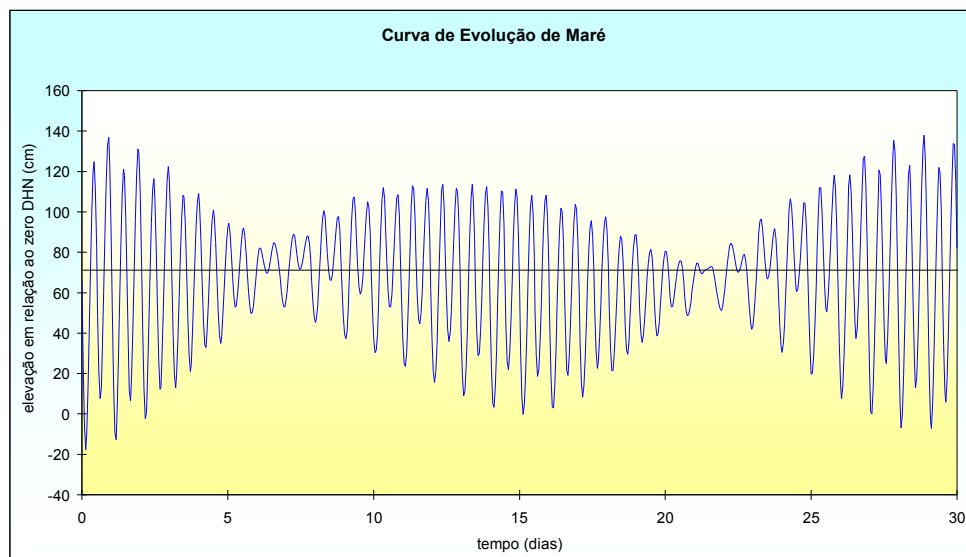


Figura 3-1: - Evolução da maré no Cabo de São Tomé.

3.2 Batimetria

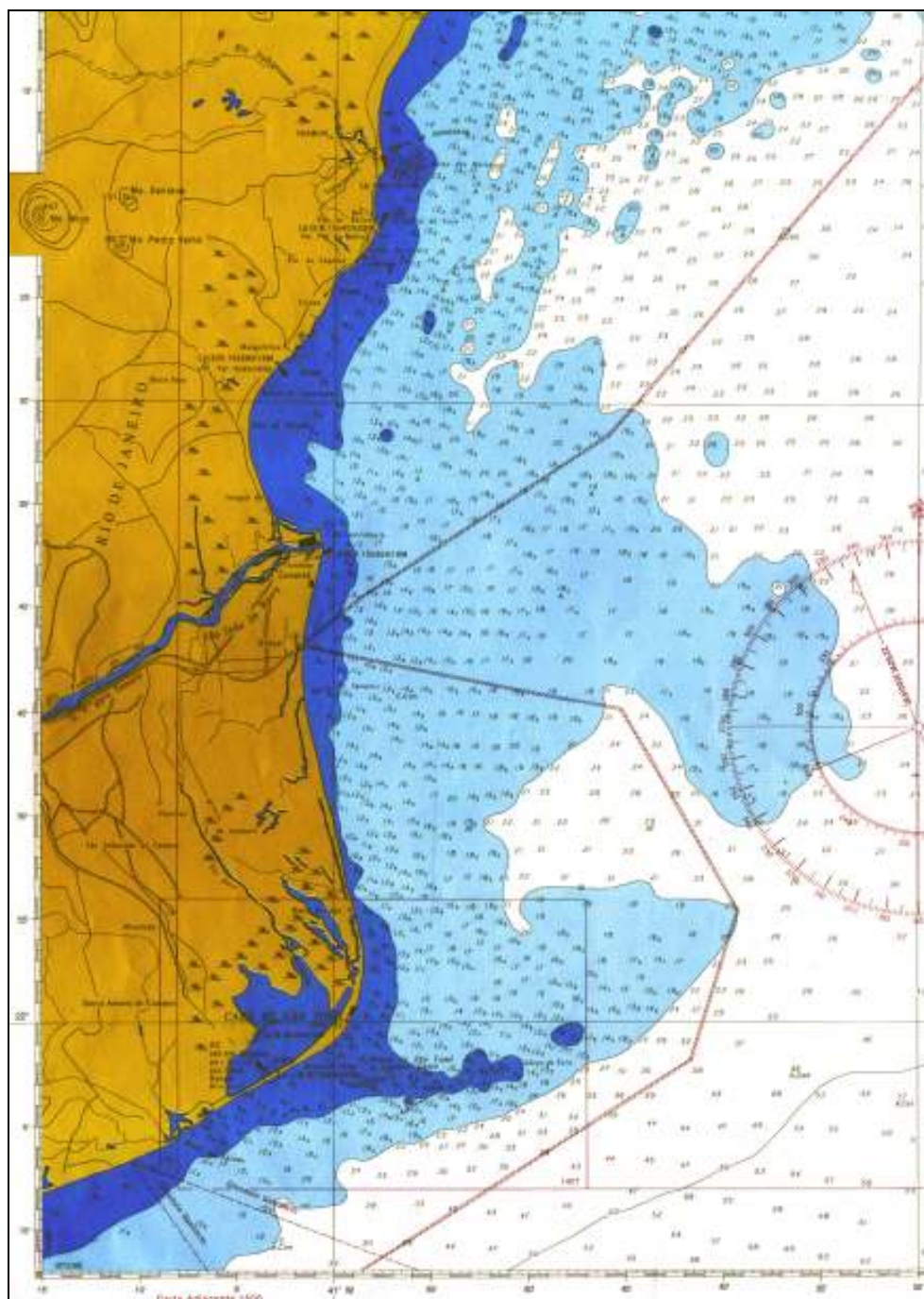
A batimetria da região próxima à costa da Barra do Açu é caracterizada por uma extensa “plataforma”, na qual a isóbata de 20m alcança uma distância de 34 km da costa, chegando a atingir ainda distâncias de até 45 km em frente à estação de Grussaí, fim da estrada de ferro para Campos que se localiza ao sul da foz do rio Paraíba do Sul. Esta feição caracterizada pela isóbata de 20m, se inicia no Cabo de São Tomé, quando o alinhamento da costa muda de SW-NE para S-N, e segue até a Ponta dos Castelhanos, ao norte da foz do Rio Paraíba do Sul, nas coordenadas de 40°40’W e 20°45’S, onde a partir de então segue margeando a costa brasileira rumo a norte com distâncias inferiores a 5 km da costa. A Figura 3-2 mostra cópia de parte da carta náutica nº 1400 – do rio Doce ao Cabo de São Tomé – do Departamento de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil, onde tal plataforma pode ser vista.

Em frente à Barra do Açu, a isóbata de 10m se distancia cerca de 4,5 km da costa; já a isóbata de 20 m se distancia 34 km; a de 50 m, cerca de 65 km. Neste trecho, a plataforma

continental, caracterizada pelo início da brusca declividade do fundo do mar, tem largura de cerca de 100 km, pois isóbata de 100 e 1000 m se distanciam, respectivamente, a 92 e 112 km da costa.

No trecho próximo ao Cabo de São Tomé, também se encontra o banco de areia de São Tomé, caracterizado pela extensão da isóbata de 10 m até a uma distância de cerca de 16 km da costa, no trecho em frente ao Farol do Açú. Tal banco de areia tem alinhamento oeste-leste e, em média, uma largura de 3,0 km, e se estende do Baixio do Veiga, na costa, até o Cabeço de Fora, cujas coordenadas são 40°48'W e 22° S, onde também se encontra um pequeno banco de areia com diâmetro de 3,0 km. A isóbata de 10m tem, na altura da Barra do Furado, uma largura de cerca de 4,5 km, passando, a partir daí, a exibir uma distância maior da costa, caracterizando o início do banco de areia. Ao norte do banco de São Tomé, a isóbata de 10m volta a se aproximar da costa, distando apenas 600m da mesma, no trecho próximo à Barra do Açú, onde isóbata tem cerca de 1,5 km de distância da costa. A partir de a isóbata de 10m volta a se afastar, mantendo este aspecto até a foz do rio Paraíba do Sul, onde tem uma largura de 3,0 km.

Profundidades ainda mais rasas são encontradas no interior do banco de São Tomé (carta náutica nº 1407 da DHN). Tal banco, fino e extenso, se caracteriza pela isóbata de 5 m, tem cerca de 8,0 km de comprimento e 200 m de largura. Devido à presença deste banco de areia, alguns naufrágios ocorreram no passado, onde se encontram pelo menos três cascos de navios afundados nesta localidade, nas coordenadas de 40°57'W e 22°3'S, 40°56'W e 22°3'S, e 40°56'W e 22°4'S.



Fonte: DHN - Marinha do Brasil, 1941

**Figura 3-2: - Cópia parcial da carta náutica no 1400 – do rio Doce ao Cabo de São
Tomé.**

4 MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

A seguir apresenta-se a metodologia e os resultados das simulações computacionais realizadas com o intuito de representar a dispersão dos sedimentos em suspensão na coluna d'água gerados durante a dragagem realizada na jazida de areia próxima ao Porto de Açu.

Para a representação do padrão hidrodinâmico na região em que se encontra o empreendimento e da sua provável área de influência adotou-se o modelo hidrodinâmico bidimensional em planta (2DH). A dispersão dos sedimentos originados da operação de dragagem foi simulada através do modelo de transporte Lagrangeano.

Neste capítulo é apresentada, ainda, uma análise comparativa entre os dados medidos *in loco*, em estações próximas ao empreendimento durante o período de março de 2007 a junho de 2008, e os dados fornecidos pelo modelo computacional. Estes dados medidos serviram para a validação dos resultados da modelagem, demonstrando se estes estão de acordo com a situação real.

É importante ressaltar que os dados de maré e ventos medidos *in loco* não serviram como dados de entrada do modelo devido ao curto período de medição dos mesmos. Dados com poucos anos de medição podem retratar um comportamento atípico da região de análise, apresentando fenômenos pontuais como freqüentes. Para uma melhor caracterização da região em estudo, é usual priorizar a utilização de séries históricas, com grandes períodos de observação.

4.1 Modelagem Hidrodinâmica

Apresenta-se na seqüência os dados de entrada utilizados na simulação do padrão hidrodinâmico da região de interesse, a malha de discretização do domínio modelado e, por fim, os resultados obtidos.

4.1.1 Dados de Entrada

Batimetria

Os contornos terrestres e as informações batimétricas foram extraídos das seguintes fontes:

- Levantamento batimétrico contido no desenho CO33-DES-000-01-001, elaborado pela Ram Engenharia Ltda.: o levantamento restringe-se à região do porto e do canal de acesso a ser dragado, conforme mostra a Figura 4-1
- Cartas náuticas nos 1403 (escala 1:134.038) e 1500 (escala 1:300.000) da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marina do Brasil (DHN): as informações contidas nessas cartas foram utilizadas para definir os contornos de costa e as profundidades no interior do domínio, exceto na região em que o levantamento batimétrico recente foi realizado.

Na Figura 4-2 é ilustrada a batimetria conforme interpolada pelo modelo. As profundidades estão referenciadas ao nível zero do IBGE, que corresponde ao nível médio do mar na cidade de Imbituba, SC.

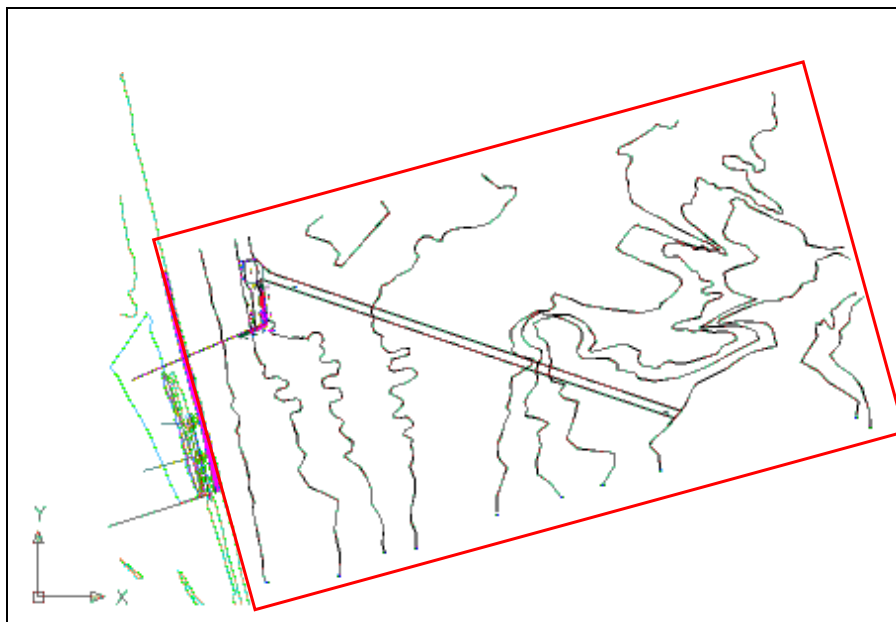


Figura 4-1: Desenho do projeto do Porto do Açú e indicação, em vermelho, dos limites do levantamento batimétrico.

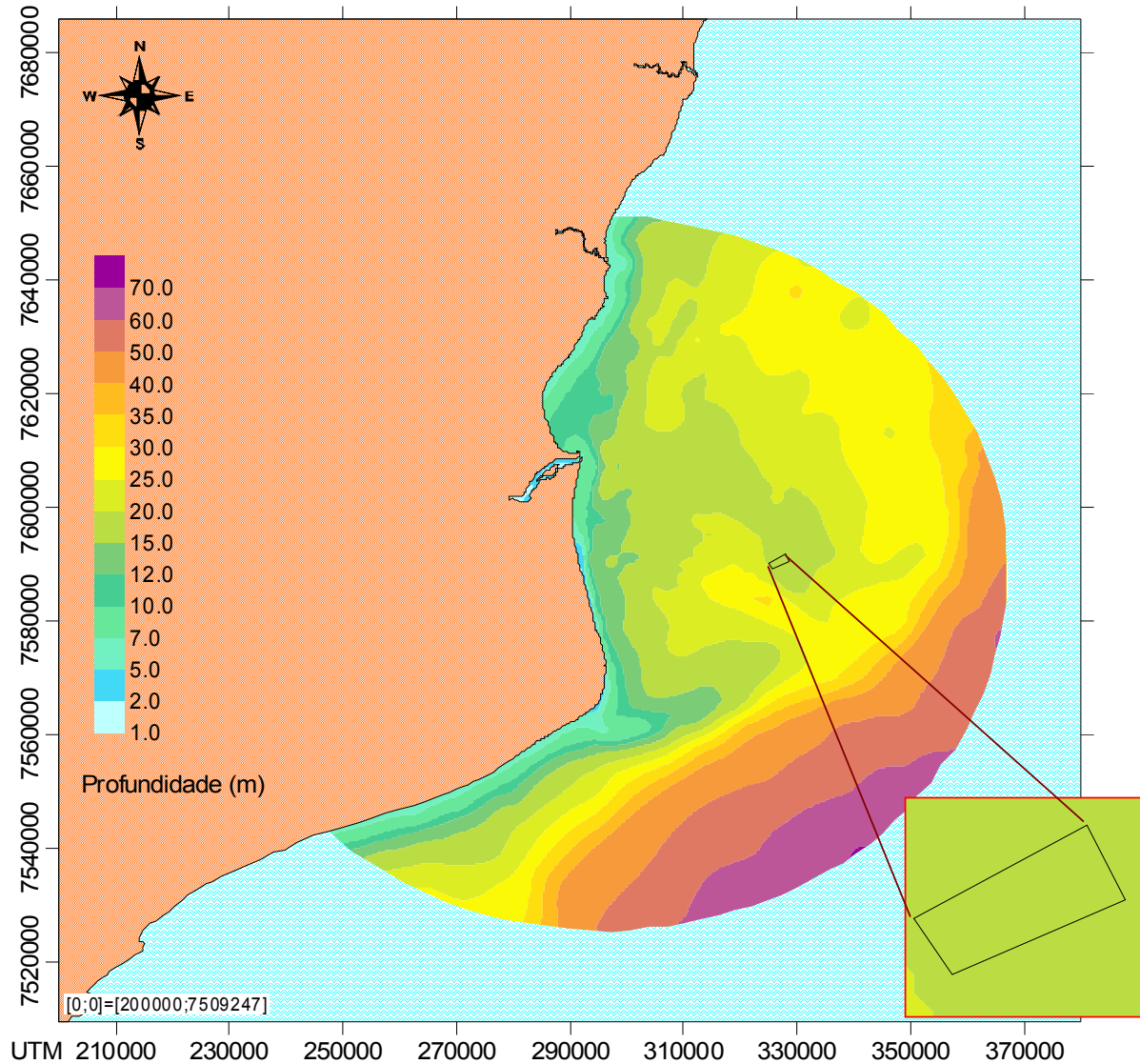


Figura 4-2: Configuração batimétrica geral no domínio do modelo. Profundidades referenciadas ao nível zero do IBGE.

Ventos

No local do empreendimento e nas regiões mais ao largo o vento exerce importante papel na definição do padrão hidrodinâmico. Por isso, deve-se considerá-lo na modelagem computacional.

Com base nos dados de intensidade e direção dos ventos na região do Cabo de São Tomé, obtidos pelo Departamento de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil no período de 1957 a 1997, verificou-se que os ventos mais freqüentes são provenientes de nordeste, com intensidade média de 6,51 m/s. A Tabela 4-1 apresenta os resultados da análise estatística elaborada a partir desses dados.

Na modelagem computacional foram analisados dois cenários, ambos considerando o vento constante ao longo do período de simulação e atuante em toda a região do domínio do modelo: o primeiro utilizando o vento mais freqüente, de nordeste, e o segundo considerando o vento de sudoeste, de cerca de 10% de ocorrência na região. O vento de sudoeste foi escolhido para simular a entrada de uma frente fria na região.

Nestas simulações foram considerados ventos constantes como forma de simular a situação mais desfavorável de cada cenário analisado. A utilização de ventos constantes implica numa capacidade maior de transmissão de energia, possibilitando a pluma de sedimentos alcançar maiores distâncias em comparação à situação de utilização de ventos variáveis. Além disto, os dados de ventos considerados foram medidos para um único ponto, localizados no Cabo de São Tomé, e adotados para toda a região de estudo.

Tabela 4-1: Freqüências de ocorrência e velocidades médias dos ventos no Cabo de São Tomé no período de dezembro de 1957 a junho de 1997.

| PARÂMETROS | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW |
|-------------------------|-------|--------------|-------|------|-------|-------|------|------|
| Freqüência (%) | 12,78 | 28,37 | 13,79 | 6,36 | 11,91 | 10,19 | 5,24 | 2,42 |
| Velocidade (m/s) | 3,91 | 6,51 | 4,49 | 4,19 | 4,39 | 5,34 | 3,42 | 3,20 |

Fonte: DHN

Maré

A inserção dos efeitos da maré é feita através da prescrição de elevação do nível d'água na fronteira aberta do domínio. Para o estudo em questão a série temporal de elevação do nível d'água, apresentada na Figura 4-3, foi confeccionada com base nas constantes harmônicas fornecidas pela DHN para uma estação maregráfica localizada na localidade de Atafona, RJ, na foz do Rio Paraíba do Sul, nas coordenadas geográficas 21°39' S e 41°04' W. As principais constantes utilizadas são apresentadas na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Principais constantes harmônicas da estação maregráfica de Atafona, RJ.

| Constante harmônica | Período (s) | Amplitude (m) | Fase (rad) |
|---------------------|-------------|---------------|------------|
| M2 | 44714,16 | 0,398 | 1,79769 |
| S2 | 43200,00 | 0,187 | 2,04203 |
| O1 | 92949,63 | 0,092 | 2,00712 |
| N2 | 45570,05 | 0,073 | 1,90240 |
| K1 | 86164,09 | 0,052 | 3,01942 |
| K2 | 43082,05 | 0,051 | 2,04203 |
| M4 | 22357,08 | 0,033 | 1,81514 |
| MS4 | 21972,02 | 0,030 | 2,40855 |
| P1 | 86637,20 | 0,017 | 3,01942 |

Fonte: FEMAR (2000).

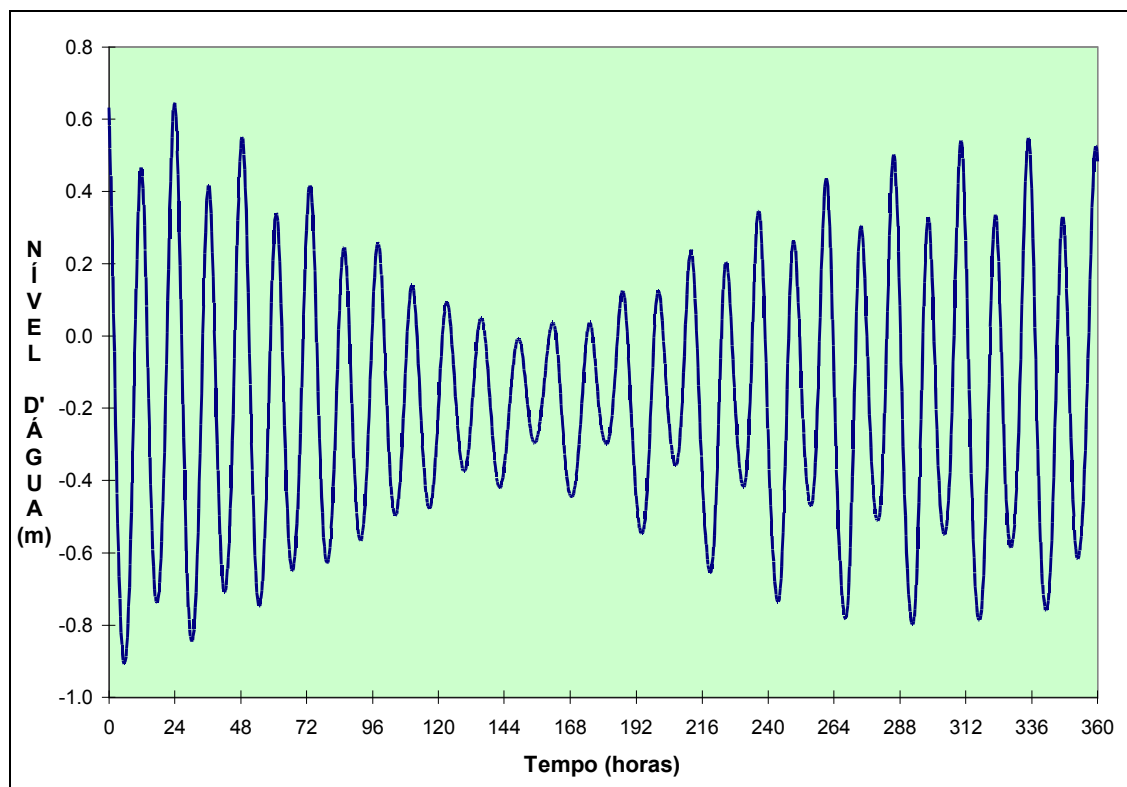


Figura 4-3: Série temporal de elevação do nível d'água confeccionada a partir das constantes harmônicas apresentadas na Tabela 4-2

Vazões Fluviais

Dentre os rios que deságuam na região considerada no domínio de modelagem, o Rio Paraíba do Sul é o que possui as vazões mais significativas. De acordo com LABHID (2002), a vazão média de longo período na foz do rio é de 870,22 m³/s, valor este incluído na simulação hidrodinâmica.

Apesar da vazão do rio Paraíba do Sul variar bastante entre os meses chuvosos e o período de estiagem, a modelagem considerou a vazão média, já que o comportamento hidrodinâmico deste rio pouco influencia o local do empreendimento. Deve-se lembrar que num estuário, o maior volume de água que passa na foz é principalmente devido ao prisma de maré.

Discretização do Domínio

O domínio do modelo foi discretizado em 437 elementos finitos quadrangulares, totalizando 1831 pontos de cálculo. A Figura 4-4 ilustra todo o domínio, enquanto que a Figura 4-5 ilustra o detalhe que inclui a região do empreendimento e a foz do Rio Paraíba do Sul. Como pode ser observado, adotou-se uma malha mais refinada nestas regiões para uma melhor representação da hidrodinâmica local.

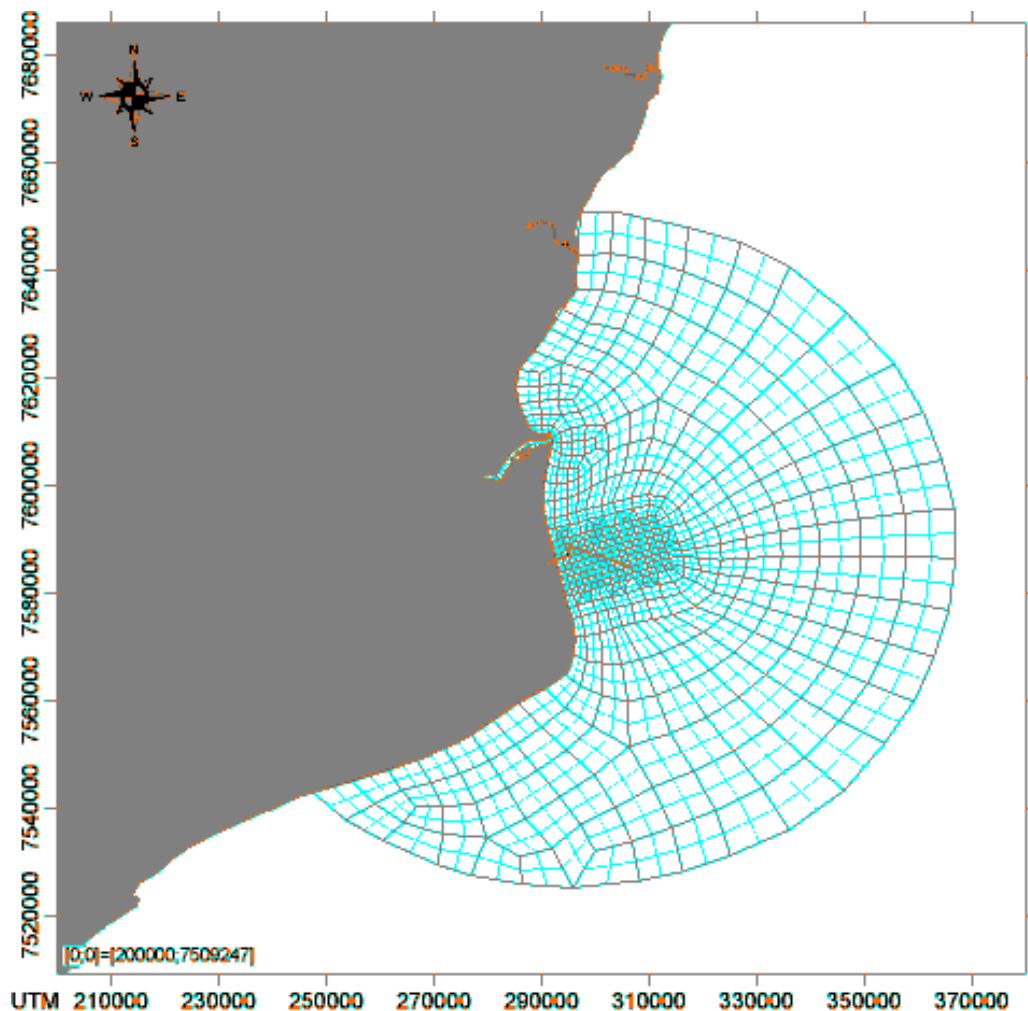


Figura 4-4: Malha de discretização do domínio do modelo. As linhas em cinza ligam os nós intermediários dos elementos

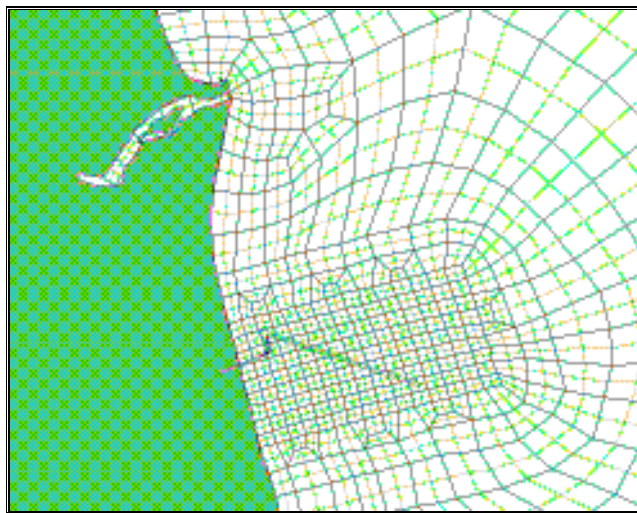


Figura 4-5: Detalhe da malha de discretização na região do empreendimento e foz do Rio Paraíba do Sul

4.1.2 Resultados do Modelo Hidrodinâmico

Na sequência da Figura 4-6 a Figura 4-9 são apresentados resultados de correntes máximas para Norte e Sul, para ambas simulações consideradas.

Como pode ser observado, geralmente os resultados numéricos na região da nova jazida de areia apontam para correntes com velocidades máximas entre 0,50 m/s e 0,60 m/s (para melhor visualização, esta região é mostrada em detalhe no canto esquerdo de cada figura). Verifica-se, ainda, que para o caso de correntes máximas para norte/nordeste (considerando ventos de sudoeste), a velocidade máxima próxima a região da nova jazida é de 0,60 m/s a 0,70 m/s.

A tendência do escoamento para Sul/Sudeste deve-se basicamente aos ventos predominantes de Nordeste, que forçam as correntes nesta direção.

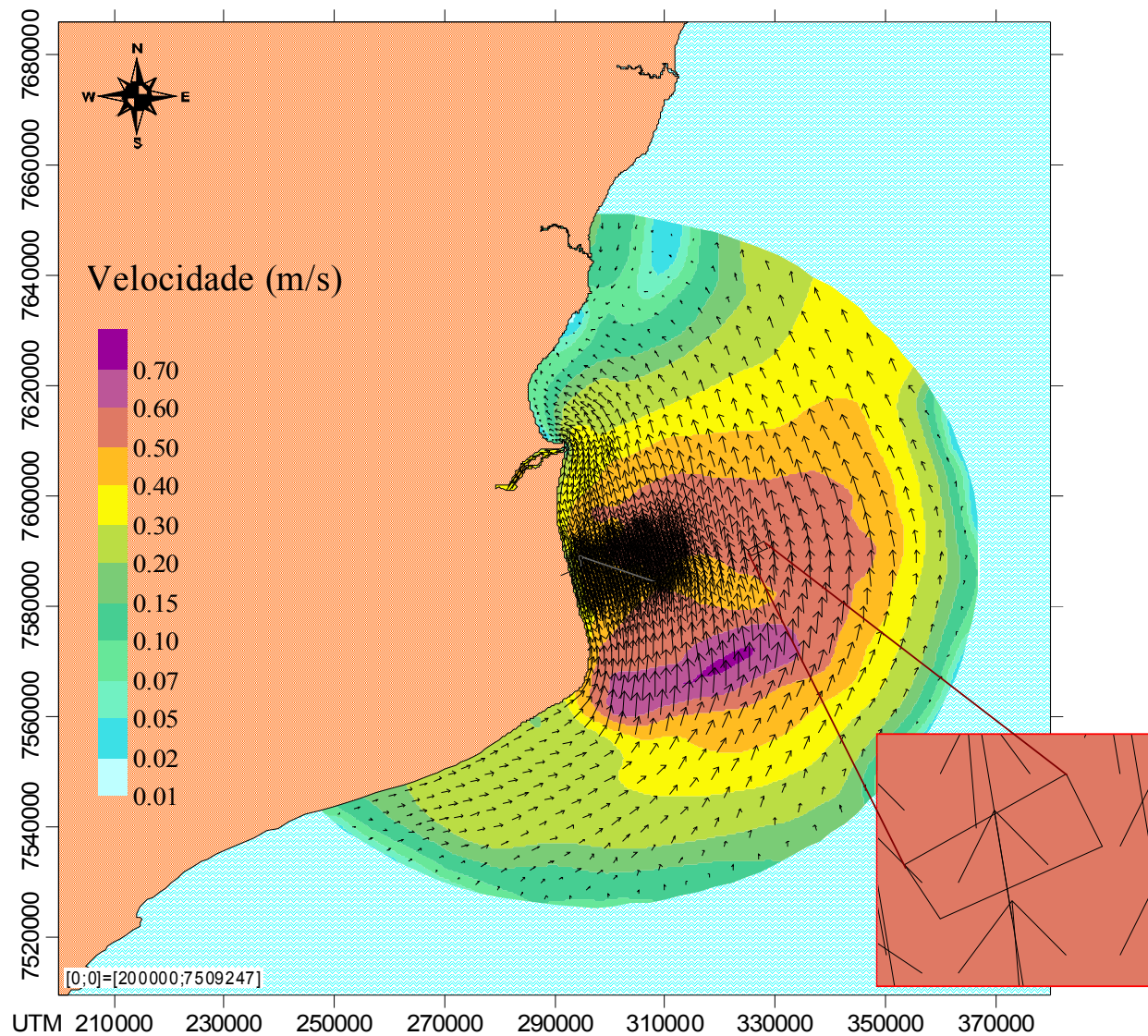


Figura 4-6: Padrão de correntes máximas para Norte/Nordeste (simulação com ventos de NE)

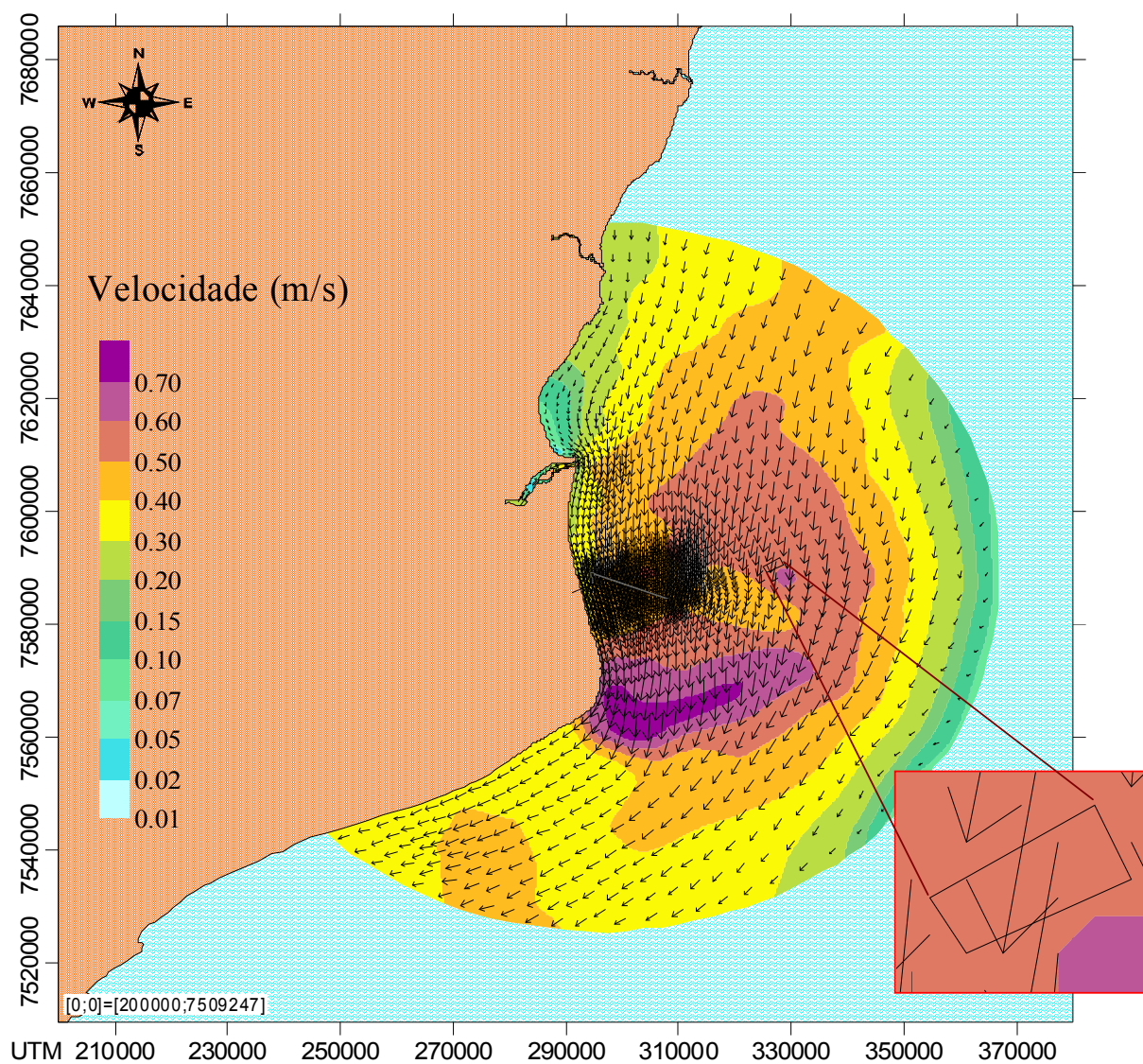


Figura 4-7: Padrão de correntes máximas para Sul/Sudoeste (simulação com ventos de NE).

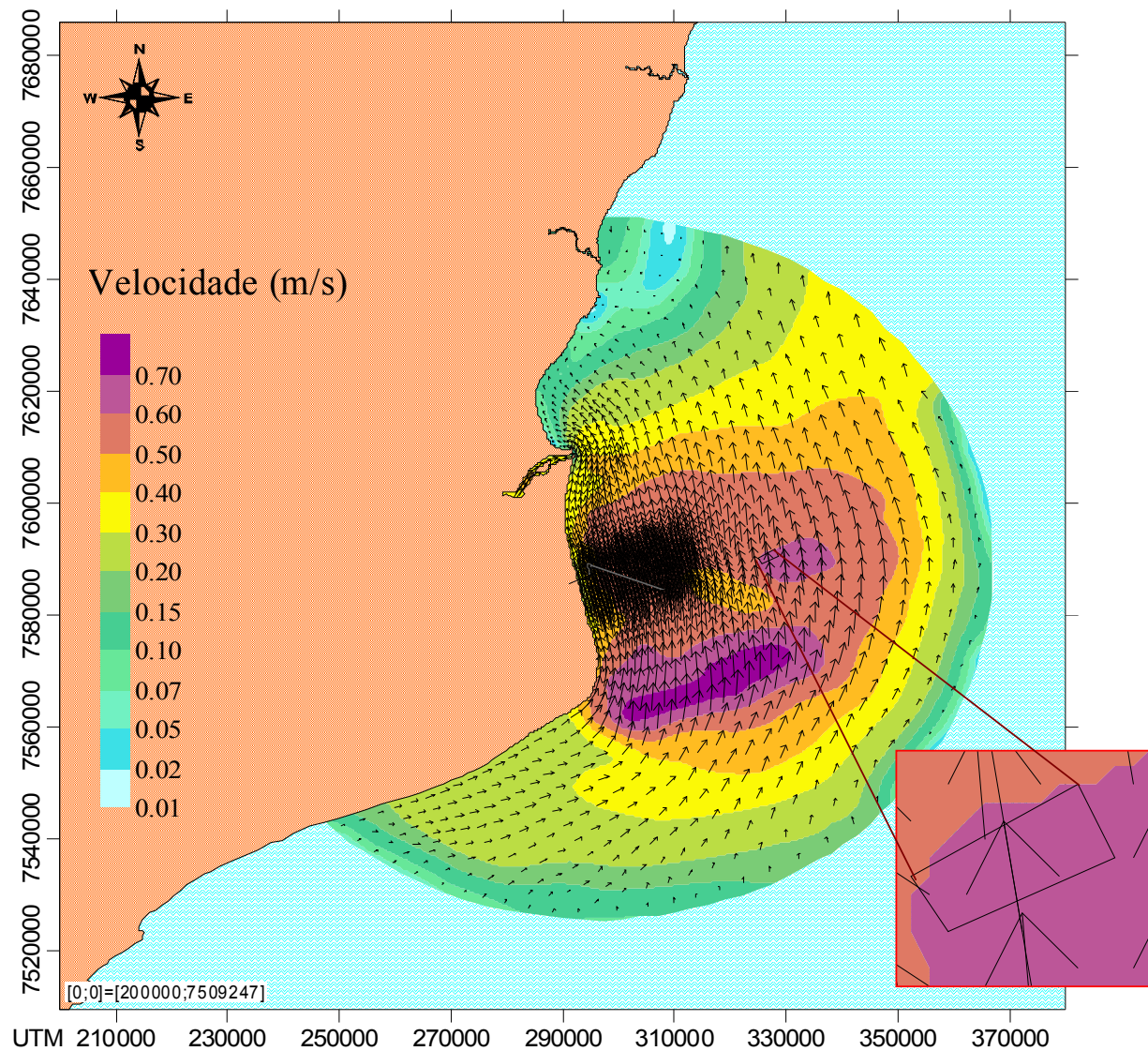


Figura 4-8: Padrão de correntes máximas para Norte/Nordeste(simulação com ventos de SW).

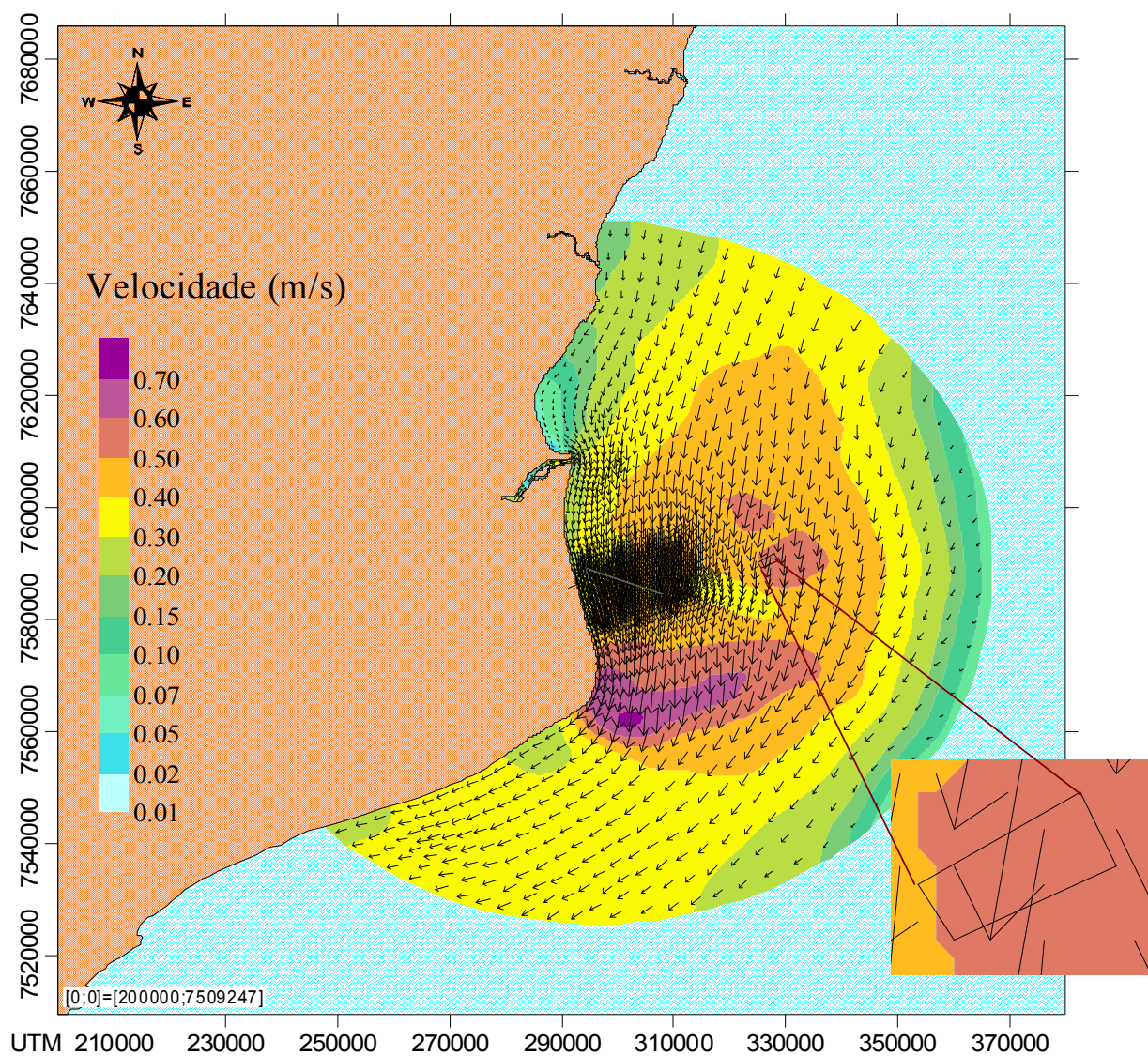


Figura 4-9: Padrão de correntes máximas para Sul/Sudoeste (simulação com ventos de SW).

4.2 Validação do modelo com os dados coletados

Para melhor avaliar os resultados das simulações realizadas pelo SISBAHIA na região do Porto de Açu, o presente relatório tem o objetivo de comparar as informações geradas pelo modelo computacional e utilizadas como dados de entrada com aqueles medidos na área de estudo.

A seguir são apresentadas as análises feitas para os dados de ventos, maré e de velocidade de correntes coletados em estação localizada na praia do Açu no período de Março de 2007 a Junho de 2008.

4.2.1 Análise dos ventos

A análise dos ventos foi feita mediante comparação dos dados de intensidade e direção dos ventos da região do Cabo de São Tomé, obtidos pelo DHN no período de 1957 a 1997, com os dados medidos *in loco*, obtidos entre março de 2007 a junho de 2008 na Estação Meteorológica do Açu, em São João da Barra (coordenadas UTM 294.813 e 7.576.973). Foram realizadas 16 campanhas de coleta no total, cujas características principais são apresentadas na Tabela 4-3.

Tabela 4-3: Características principais do período de coleta de cada campanha de ventos.

| Campanha | Primeira Amostra | Última Amostra | Total dias | n° Amostras |
|----------|------------------|-----------------|------------|-------------|
| 1 | 25-fev-07 15:30 | 31-mar-07 10:00 | 33,8 | 4864 |
| 2 | 31-mar-07 12:10 | 04-mai-07 17:20 | 34,2 | 4928 |
| 3 | 04-mai-07 17:40 | 01-jun-07 10:50 | 27,7 | 3992 |
| 4 | 01-jun-07 11:10 | 28-jun-07 13:10 | 27,1 | 3901 |
| 5 | 28-jun-07 13:50 | 26-jul-07 10:30 | 27,9 | 4013 |
| 6 | 26-jul-07 10:50 | 30-ago-07 14:50 | 35,2 | 5065 |
| 7 | 30-ago-07 15:10 | 28-set-07 11:20 | 28,8 | 4154 |
| 8 | 28-set-07 11:50 | 28-out-07 11:20 | 30,0 | 4318 |
| 9 | 28-out-07 11:40 | 02-dez-07 11:20 | 35,0 | 5039 |
| 10 | 02-dez-07 11:40 | 27-dez-07 11:50 | 25,0 | 3602 |

Tabela 4-3: Características principais do período de coleta de cada campanha de ventos.

| Campanha | Primeira Amostra | Última Amostra | Total dias | n° Amostras |
|----------|------------------|-----------------|------------|-------------|
| 11 | 27-dez-07 13:00 | 30-jan-08 10:40 | 33,9 | 4883 |
| 12 | 30-jan-08 11:00 | 29-fev-08 12:30 | 30,1 | 4330 |
| 13 | 29-fev-08 13:00 | 06-abr-08 13:10 | 37,0 | 5330 |
| 14 | 06-abr-08 13:40 | 28-abr-08 16:40 | 22,1 | 3187 |
| 15 | 28-abr-08 17:00 | 31-mai-08 10:50 | 32,7 | 4716 |
| 16 | 31-mai-08 11:10 | 21-jun-08 17:20 | 21,3 | 3062 |

Os dados desta estação foram medidos a cada 10 minutos, com azimutes que variam entre 0° a 360°. Sendo assim, para se obter a probabilidade de ocorrência para cada sentido e sua respectiva velocidade média, os azimutes foram agrupados nos sentidos principais, conforme Tabela 4-4 a seguir.

Tabela 4-4: Intervalo de agrupamento nas direções principais

| Sentido | Azimutes (°) | |
|---------|--------------|-------|
| | de | a |
| N | 337,5 | 22,5 |
| NE | 22,5 | 67,5 |
| E | 67,5 | 112,5 |
| SE | 112,5 | 157,5 |
| S | 157,5 | 202,5 |
| SW | 202,5 | 247,5 |
| W | 247,5 | 292,5 |
| NW | 292,5 | 337,5 |

A Tabela 4-5 apresenta a frequência de ocorrência e velocidades médias dos ventos medidos na Estação Meteorológica de Açú. Observa-se que os ventos mais frequentes em todas as campanhas são os provenientes de nordeste, com velocidade média de 5,0 m/s.

Verifica-se, portanto, que os dados medidos in loco apresentam comportamento semelhante aos dados utilizados no modelo, já que apresentam o mesmo sentido preponderante e magnitude similar.

Tabela 4-5: Frequências de ocorrência e velocidades médias dos ventos na Estação Meteorológica do Açú no período de março de 2007 a junho de 2008.

| Dados | Parâmetros | Sentido Ventos | | | | | | | | Total |
|---------------------------------|------------------|----------------|-------------|------|------|-----|------|------|-----|-------|
| | | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | |
| Campanha nº 1 - Março 2007 | Frequência (%) | 18,6 | 53,9 | 14,1 | 3,8 | 2,5 | 3,1 | 2,2 | 1,7 | 100,0 |
| | Velocidade (m/s) | 3,8 | 4,6 | 4,1 | 3,5 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 2,5 | |
| Campanha nº 2 - Abril 2007 | Frequência (%) | 9,4 | 18,8 | 15,2 | 12,7 | 8,1 | 17,1 | 14,6 | 4,1 | 100,0 |
| | Velocidade (m/s) | 4,3 | 4,4 | 3,7 | 3,6 | 3,3 | 2,5 | 2,0 | 2,0 | |
| Campanha nº 3 - Maio 2007 | Frequência (%) | 18,6 | 53,9 | 14,1 | 3,8 | 2,5 | 3,1 | 2,2 | 1,7 | 100,0 |
| | Velocidade (m/s) | 4,1 | 3,8 | 5,4 | 4,3 | 2,9 | 4,1 | 2,1 | 1,8 | |
| Campanha nº 4 - Junho 2007 | Frequência (%) | 24,0 | 43,3 | 7,6 | 3,6 | 3,4 | 9,1 | 6,4 | 2,6 | 100,0 |
| | Velocidade (m/s) | 4,4 | 4,2 | 4,1 | 4,5 | 3,6 | 3,1 | 1,9 | 2,3 | |
| Campanha nº 5 - Julho 2007 | Frequência (%) | 24,5 | 36,2 | 5,8 | 4,6 | 8,2 | 13,7 | 5,5 | 1,5 | 100,0 |
| | Velocidade (m/s) | 6,0 | 5,3 | 3,4 | 3,8 | 2,9 | 3,5 | 1,7 | 1,9 | |
| Campanha nº 6 - Agosto 2007 | Frequência (%) | 9,0 | 47,5 | 7,7 | 7,3 | 6,1 | 16,2 | 5,8 | 0,4 | 100,0 |
| | Velocidade (m/s) | 5,4 | 5,8 | 5,7 | 5,1 | 3,4 | 3,5 | 2,2 | 2,0 | |
| Campanha nº 7 - Setembro 2007 | Frequência (%) | 4,1 | 67,3 | 11,8 | 3,4 | 3,0 | 9,3 | 1,1 | 0,2 | 100,0 |
| | Velocidade (m/s) | 5,1 | 6,8 | 7,5 | 6,3 | 4,5 | 4,3 | 1,4 | 1,2 | |
| Campanha nº 8 - Outubro 2007 | Frequência (%) | 5,3 | 50,8 | 17,6 | 7,5 | 4,5 | 10,8 | 1,9 | 1,5 | 100,0 |
| | Velocidade (m/s) | 4,7 | 7,4 | 6,2 | 4,7 | 3,2 | 3,4 | 1,5 | 1,6 | |
| Campanha nº 9 - Novembro 2007 | Frequência (%) | 13,9 | 39,9 | 6,4 | 13,8 | 9,7 | 12,1 | 3,7 | 0,4 | 100,0 |
| | Velocidade (m/s) | 5,8 | 5,6 | 5,6 | 5,6 | 4,2 | 3,1 | 2,0 | 2,0 | |
| Campanha nº 10 - Dezembro 2007 | Frequência (%) | 16,4 | 41,3 | 6,2 | 7,8 | 8,2 | 12,3 | 5,3 | 2,5 | 100,0 |
| | Velocidade (m/s) | 5,6 | 6,1 | 5,4 | 4,9 | 3,1 | 2,4 | 1,8 | 1,8 | |
| Campanha nº 11 - Janeiro 2008 | Frequência (%) | 10,3 | 48,4 | 6,9 | 2,0 | 5,9 | 17,8 | 5,2 | 3,6 | 100,0 |
| | Velocidade (m/s) | 4,8 | 5,7 | 4,7 | 3,6 | 3,1 | 3,1 | 2,2 | 2,1 | |
| Campanha nº 12 - Fevereiro 2008 | Frequência (%) | 19,2 | 36,5 | 7,1 | 11,9 | 4,8 | 10,0 | 7,4 | 3,1 | 100,0 |
| | Velocidade (m/s) | 4,9 | 4,9 | 4,0 | 3,6 | 2,3 | 1,8 | 1,6 | 1,4 | |
| Campanha nº 13 - Março 2008 | Frequência (%) | 13,1 | 23,3 | 15,8 | 9,9 | 6,1 | 20,0 | 6,7 | 5,2 | 100,0 |
| | Velocidade (m/s) | 3,4 | 3,7 | 3,8 | 3,0 | 2,8 | 2,4 | 1,7 | 1,9 | |
| Campanha nº 14 - Abril 2008 | Frequência (%) | 12,9 | 23,0 | 11,6 | 13,9 | 5,4 | 15,4 | 8,6 | 9,2 | 100,0 |
| | Velocidade (m/s) | 3,3 | 3,2 | 4,1 | 4,9 | 2,5 | 2,7 | 1,6 | 1,6 | |
| Campanha nº 15 - Maio 2008 | Frequência (%) | 13,6 | 23,3 | 3,6 | 8,7 | 8,0 | 20,0 | 18,2 | 4,5 | 100,0 |
| | Velocidade (m/s) | 3,6 | 3,8 | 3,7 | 4,0 | 3,3 | 3,3 | 1,9 | 1,7 | |
| Campanha nº 16 - Junho 2008 | Frequência (%) | 21,7 | 26,7 | 12,8 | 6,2 | 4,6 | 13,3 | 9,7 | 5,0 | 100,0 |
| | Velocidade (m/s) | 4,0 | 4,5 | 4,6 | 3,9 | 2,6 | 3,2 | 2,1 | 2,3 | |
| Média das Campanhas | Frequência (%) | 14,7 | 39,6 | 10,3 | 7,6 | 5,7 | 12,7 | 6,5 | 2,9 | 100,0 |
| | Velocidade (m/s) | 4,6 | 5,0 | 4,7 | 4,3 | 3,1 | 3,0 | 1,8 | 1,9 | |

4.2.2 Análise da maré

A análise da maré foi feita comparando a elevação do nível d'água confeccionada pelo modelo com a elevação média medida *in loco*. Os dados de maré foram coletados na Estação S03 localizada ao largo da Praia do Açú em São João da Barra (Rio de Janeiro). No modelo, a maré foi confeccionada com base nas constantes harmônicas fornecidas pela DHN para uma estação maregráfica localizada na localidade de Atafona, RJ, na foz do Rio Paraíba do Sul (coordenadas geográficas 21°39' S e 41°04' W). As principais constantes utilizadas para confecção da maré do modelo são apresentadas na Tabela 4-2 e a elevação do nível d'água com base nestas constantes é apresentada na Figura 4-3.

Na Estação S03, os dados de onda foram coletados a cada hora. As características das campanhas de coleta de dados são apresentadas na Tabela 4-6.

Tabela 4-6: Características principais do período de coleta de cada campanha de maré.

| Campanha | Primeira Amostra | Última Amostra | Total dias | n° Amostras |
|----------|------------------|-----------------|------------|-------------|
| 1 | 27-fev-07 14:00 | 29-mar-07 11:00 | 29,9 | 718 |
| 2 | 30-mar-07 13:00 | 03-mai-07 11:00 | 33,9 | 815 |
| 3 | 04-mai-07 14:00 | 03-jun-07 09:00 | 29,8 | 716 |
| 4 | 03-jun-07 12:00 | 27-jun-07 10:00 | 23,9 | 575 |
| 5 | 27-jun-07 12:20 | 27-jul-07 09:00 | 29,9 | 717 |
| 6 | 27-jul-07 12:00 | 10-ago-07 14:40 | 14,1 | 302 |
| 7 | 31-ago-07 13:20 | 29-set-07 11:20 | 28,9 | 695 |
| 8 | 29-set-07 14:00 | 27-out-07 08:00 | 27,8 | 667 |
| 9 | 27-out-07 10:00 | 01-dez-07 10:00 | 35,0 | 841 |
| 10 | 01-dez-07 11:00 | 28-dez-07 09:00 | 26,9 | 647 |
| 11 | 28-dez-07 12:20 | 29-jan-08 09:20 | 31,9 | 766 |
| 12 | 29-jan-08 11:00 | 01-mar-08 10:00 | 32,0 | 768 |
| 13 | 02-mar-08 11:00 | 04-abr-08 13:00 | 33,1 | 795 |
| 14 | 05-abr-08 13:00 | 27-abr-08 10:00 | 21,9 | 526 |
| 15 | 28-abr-08 11:20 | 30-mai-08 10:20 | 32,0 | 768 |
| 16 | 01-jun-08 12:00 | 20-jun-08 09:00 | 18,9 | 454 |

A seqüência da Figura 4-10 a Figura 4-13 apresenta a maré medida para as campanhas realizadas no período de março de 2007 a junho de 2008. Para melhor visualização dos resultados, os gráficos de maré medidas foram agrupados a cada 4 campanhas.

Observa-se, que a maré fornecida pelo modelo está de acordo com maré medida *in loco*. Verifica-se em todos os resultados que as máximas de sizigia ficam entornho de 1,0 m e -1,0 m, enquanto que as mínimas de maré de quadratura situam-se entre 0,2 m e -0,3 m.

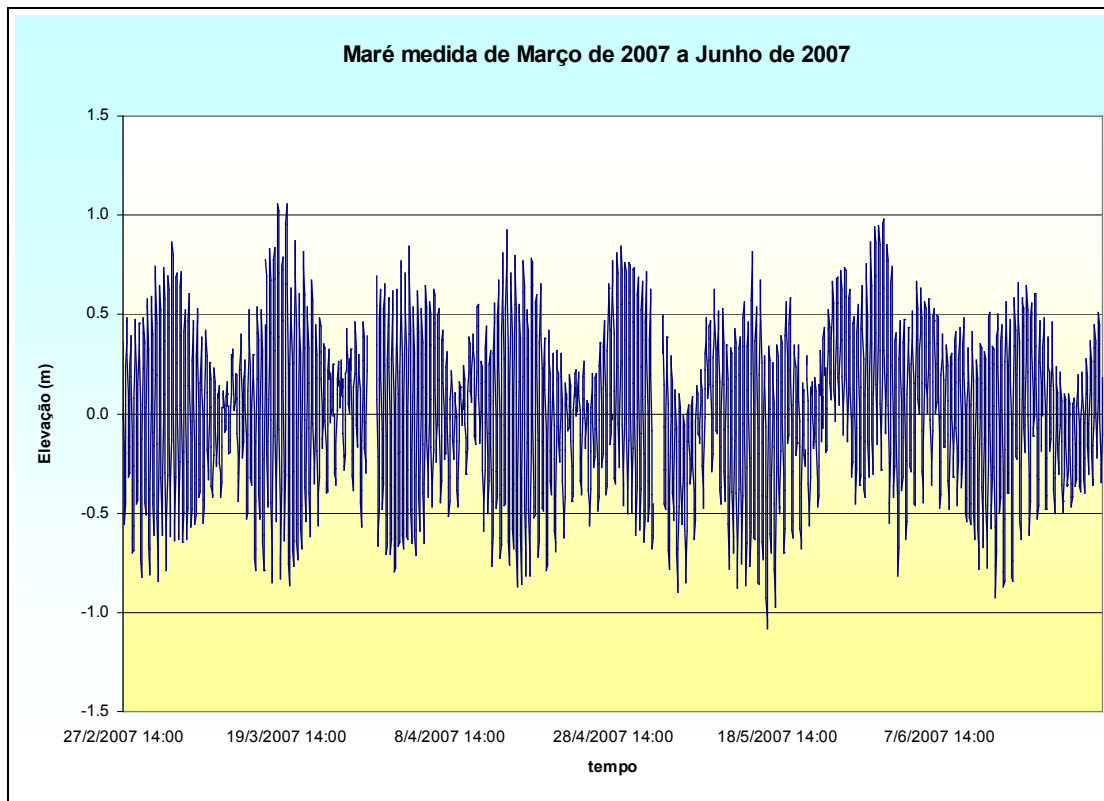


Figura 4-10: Maré confeccionada pelos dados medidos de Março/07 a Junho/07

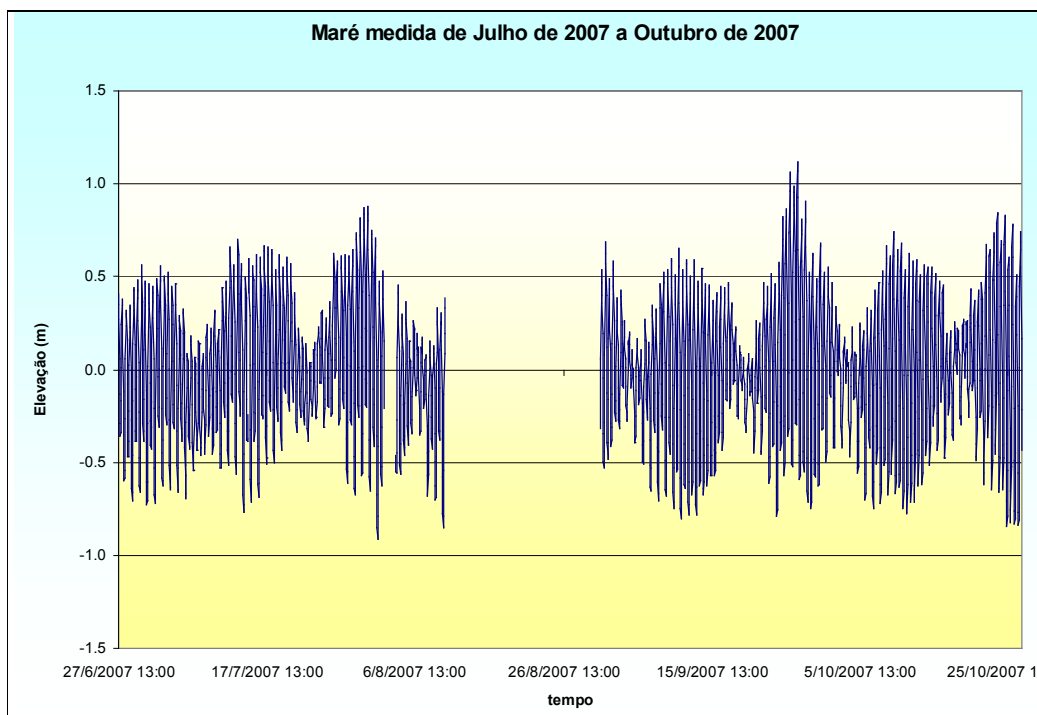


Figura 4-11: Maré confeccionada pelos dados medidos de Julho/07 a Outubro/07

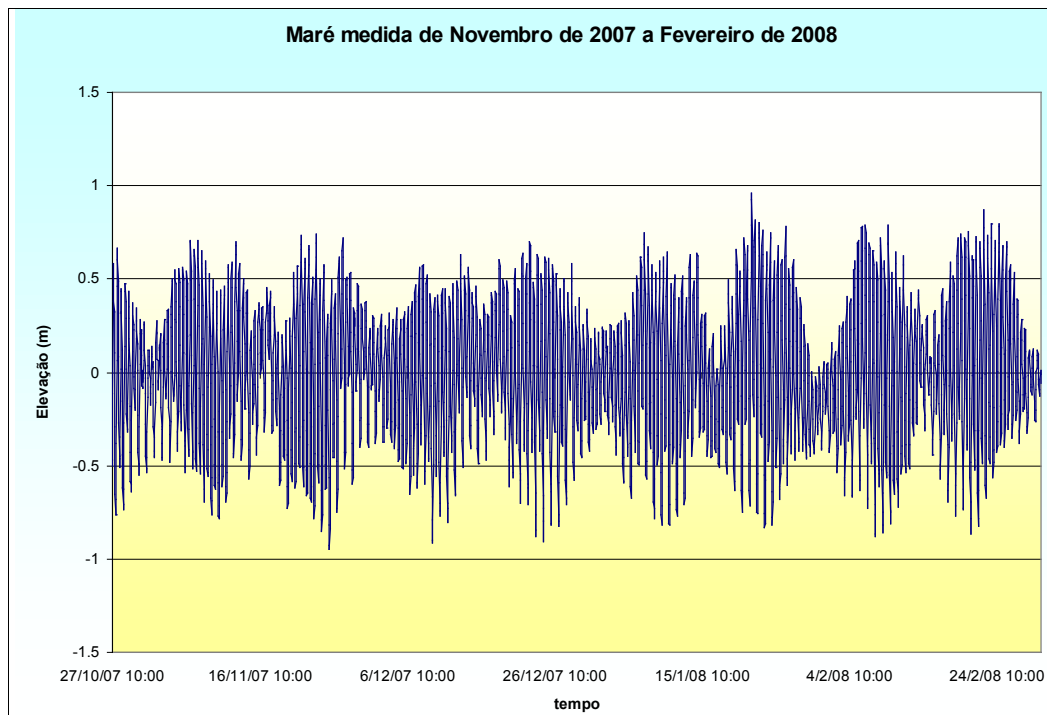


Figura 4-12: Maré confeccionada pelos dados medidos de Novembro/07 a Fevereiro/08

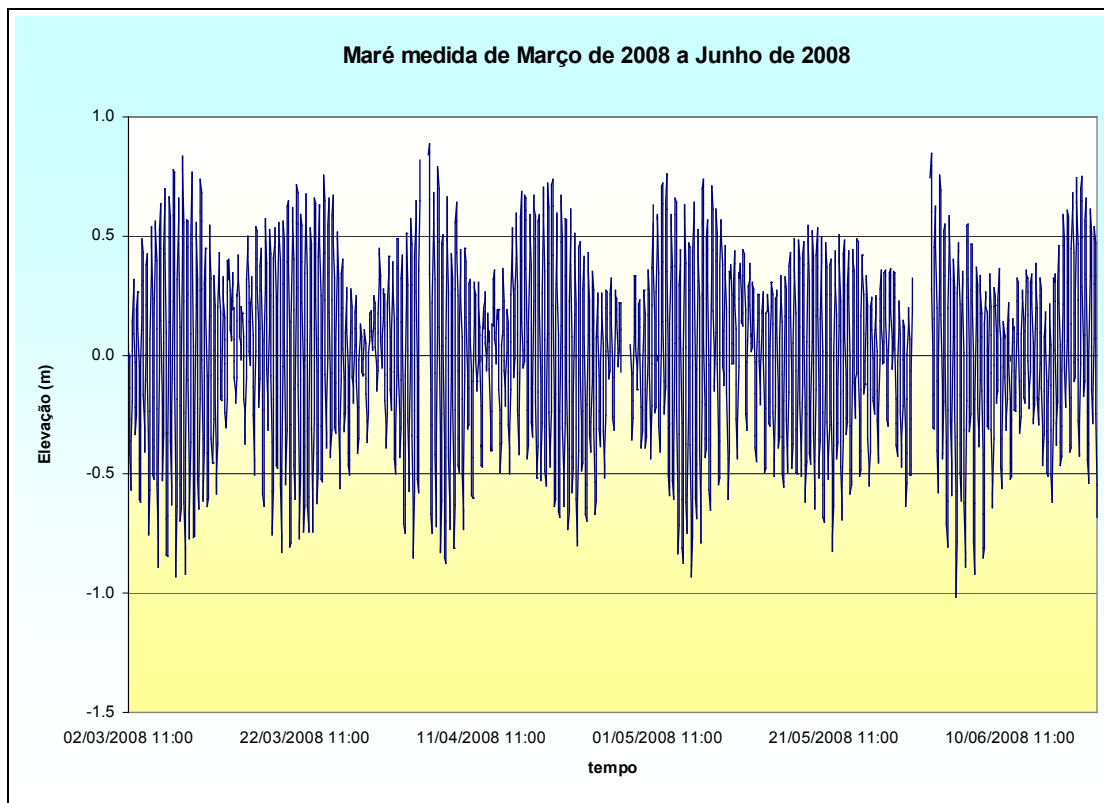


Figura 4-13: Maré confeccionada pelos dados medidos de Março/08 a Junho/08

4.2.3 Análise das correntes

A análise das correntes consistiu na comparação entre os dados calculados numericamente pelo modelo e os dados medidos na Estação S03 localizada ao largo da Praia do Açú em São João da Barra (coordenadas UTM 296.012 e 7.585.991). As grandezas analisadas foram módulo da velocidade e sentido da corrente. Os dados medidos foram coletados a cada 10 minutos, sendo o período de coleta de março de 2007 a junho de 2008 (vide Tabela 4-7). Ressalta-se que os dados fornecidos pelo modelo correspondem a um ponto próximo à Estação S03, com profundidade média de 13,5m, como pode ser observado na Figura 4-14.

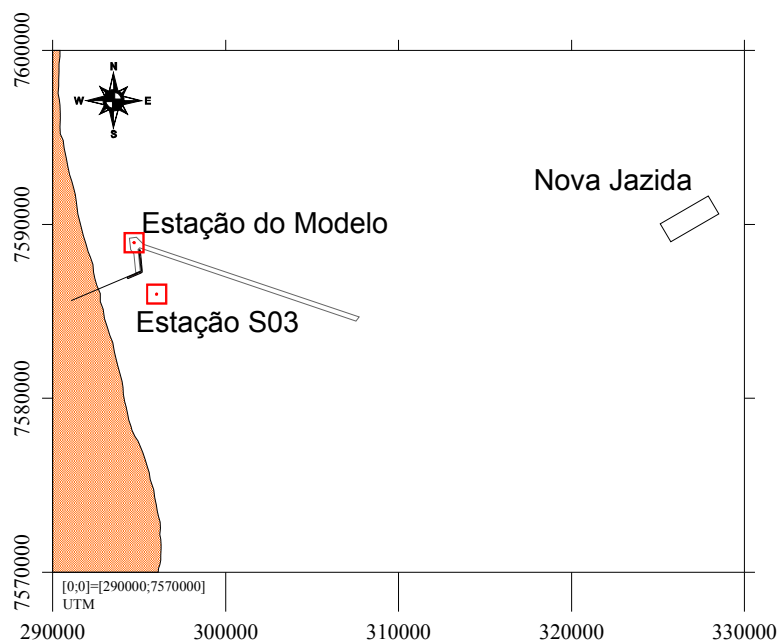


Figura 4-14: Localização da Estação utilizada pelo modelo e da Estação S03

Tabela 4-7: Características principais do período de coleta de cada campanha.

| Campanha | Primeira Amostra | Última Amostra | Total dias | n° Amostras |
|----------|------------------|-----------------|------------|-------------|
| 1 | 27-fev-07 14:00 | 29-mar-07 11:00 | 29,9 | 4303 |
| 2 | 30-mar-07 12:40 | 03-mai-07 12:40 | 34,0 | 4897 |
| 3 | 04-mai-07 13:10 | 03-jun-07 10:30 | 29,9 | 4305 |
| 4 | 03-jun-07 11:30 | 27-jun-07 11:20 | 24,0 | 3456 |
| 5 | 27-jun-07 12:20 | 27-jul-07 10:50 | 29,9 | 4312 |
| 6 | 27-jul-07 12:00 | 10-ago-07 13:40 | 14,1 | 1804 |
| 7 | 31-ago-07 12:40 | 29-set-07 11:40 | 29,0 | 4171 |
| 8 | 29-set-07 13:40 | 27-out-07 08:20 | 27,8 | 4001 |
| 9 | 27-out-07 09:40 | 01-dez-07 10:20 | 35,0 | 5045 |
| 10 | 01-dez-07 10:40 | 28-dez-07 09:50 | 27,0 | 3884 |
| 11 | 28-dez-07 11:30 | 29-jan-08 09:40 | 31,9 | 4599 |
| 12 | 29-jan-08 10:40 | 01-mar-08 10:30 | 32,0 | 4608 |
| 13 | 02-mar-08 11:00 | 04-abr-08 13:20 | 33,1 | 4767 |
| 14 | 05-abr-08 12:40 | 27-abr-08 10:50 | 21,9 | 3158 |
| 15 | 28-abr-08 10:40 | 30-mai-08 10:40 | 32,0 | 4609 |
| 16 | 01-jun-08 11:10 | 20-jun-08 10:10 | 19,0 | 2731 |

Os dados medidos na Estação, tanto os de módulo de velocidade como os de sentido, foram realizadas para diversos níveis, desde a superfície até aproximadamente 11,0 m de profundidade. Já os dados fornecidos pelo SISBAHIA são considerados constantes ao longo de toda a coluna d'água. Assim, para poder comparar os dados fornecidos pelo modelo com os dados medidos, foram determinados o valor médio de ambas as grandezas medidas na estação, para cada intervalo de tempo.

A Tabela 4-8 apresenta a porcentagem de ocorrência observada em cada sentido fornecida pelo modelo e por cada campanha realizada. Verifica-se que o sentido preponderante das correntes fornecida pelo modelo é a direção sul, com 57,1% de ocorrência, seguida pela direção norte. De modo geral, nota-se que os dados medidos também apresentam o sentido sul como preponderante, com valor médio de 50,1%. Apenas as Campanhas nº 7 e 8, referentes aos meses de setembro e outubro, respectivamente, apresentam correntes basicamente direcionadas a sudeste.

Desta forma, verifica-se que a predominância de correntes na direção sul/norte nas simulações apresentadas é observada na situação real.

A Tabela 4-9 apresenta a porcentagem de ocorrência dos módulos de velocidade das correntes. Nesta, pode ser verificado que as velocidades são normalmente baixas, tanto nos dados fornecidos pelo modelo quanto nos dados medidos *in loco*. Observa-se que cerca de 91,0% dos valores fornecidos no modelo são de velocidades de até 0,30 m/s. Já nos dados medidos, a ocorrência deste mesmo intervalo de velocidade apresenta valor médio de aproximadamente 81,0% do total observado.

Verifica-se, ainda, que o modelo possui 41,1% dos dados apresentando valores de até 0,10m/s, seguindo pelo intervalo de módulos de velocidade entre 0,10 m/s e 0,20 m/s, que apresenta 32,3% do total. Em geral, os dados medidos na Estação S03 apresentam velocidade de correntes preponderante entre 0,10 m/s a 0,20 m/s. No entanto, em alguns meses o módulo de velocidade mais recorrente ficou entre 0,20 m/s a 0,30 m/s (campanhas nº 7, 8 e 10) ou entre 0 e 0,10 m/s (campanha nº15).

Tabela 4-8: Sentido das Correntes

| Dados | Direção Corrente (%) | | | | | | | | Total |
|---------------------------------|----------------------|-----|-----|-------------|-------------|------|------|------|-------|
| | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | |
| SISBAHIA (ventos 6,51 m/s NE) | 34,8 | 0,7 | 1,4 | 1,9 | 57,1 | 1,0 | 0,6 | 2,5 | 100,0 |
| SISBAHIA (ventos 5,34 m/s SW) | 51,9 | 0,3 | 0,7 | 2,2 | 37,2 | 1,8 | 1,2 | 4,7 | 100,0 |
| Campanha nº 1 - Março 2007 | 0,2 | 0,1 | 0,9 | 32,9 | 50,0 | 9,3 | 3,3 | 3,3 | 100,0 |
| Campanha nº 2 - Abril 2007 | 1,9 | 0,0 | 1,6 | 24,5 | 46,1 | 10,0 | 5,9 | 10,0 | 100,0 |
| Campanha nº 3 - Maio 2007 | 20,3 | 1,0 | 1,8 | 7,7 | 50,1 | 6,9 | 5,2 | 7,0 | 100,0 |
| Campanha nº 4 - Junho 2007 | 9,5 | 0,5 | 1,3 | 6,8 | 59,9 | 10,4 | 5,3 | 6,4 | 100,0 |
| Campanha nº 5 - Julho 2007 | 13,3 | 0,6 | 1,4 | 7,2 | 57,9 | 7,4 | 4,5 | 7,6 | 100,0 |
| Campanha nº 6 - Agosto 2007 | 9,4 | 0,7 | 2,0 | 16,1 | 33,0 | 4,7 | 4,3 | 29,8 | 100,0 |
| Campanha nº 7 - Setembro 2007 | 0,5 | 0,0 | 0,1 | 62,1 | 24,5 | 1,2 | 1,3 | 10,3 | 100,0 |
| Campanha nº 8 - Outubro 2007 | 0,8 | 0,4 | 2,0 | 63,2 | 26,1 | 2,8 | 1,4 | 3,1 | 100,0 |
| Campanha nº 9 - Novembro 2007 | 6,0 | 0,7 | 2,6 | 11,8 | 57,6 | 8,5 | 5,0 | 7,6 | 100,0 |
| Campanha nº 10 - Dezembro 2007 | 1,6 | 0,4 | 1,4 | 7,2 | 67,9 | 10,6 | 5,7 | 5,3 | 100,0 |
| Campanha nº 11 - Janeiro 2008 | 1,1 | 0,3 | 0,7 | 3,6 | 76,8 | 11,4 | 3,7 | 2,5 | 100,0 |
| Campanha nº 12 - Fevereiro 2008 | 1,4 | 0,1 | 0,7 | 14,5 | 61,6 | 11,8 | 5,5 | 4,3 | 100,0 |
| Campanha nº 13 - Março 2008 | 1,2 | 0,4 | 1,2 | 11,2 | 64,1 | 10,0 | 6,8 | 5,1 | 100,0 |
| Campanha nº 14 - Abril 2008 | 2,3 | 0,3 | 2,1 | 15,6 | 39,7 | 19,1 | 10,9 | 10,0 | 100,0 |
| Campanha nº 15 - Maio 2008 | 4,7 | 0,5 | 3,0 | 22,0 | 37,0 | 8,2 | 5,6 | 19,1 | 100,0 |
| Campanha nº 16 - Junho 2008 | 5,2 | 0,2 | 2,0 | 12,3 | 49,2 | 7,2 | 5,8 | 18,2 | 100,0 |
| Média das Campanhas | 5,0 | 0,4 | 1,5 | 19,9 | 50,1 | 8,7 | 5,0 | 9,4 | 5,0 |

Tabela 4-9: Módulo de Velocidade das Correntes

| Dados | Módulo de Velocidade de Correntes (%) | | | | | | | Total |
|---------------------------------|---------------------------------------|-------------|-------------|------|------|------|-------|-------|
| | 0,10 | 0,20 | 0,30 | 0,40 | 0,50 | 0,60 | >0,60 | |
| SISBAHIA (ventos 6,51 m/s NE) | 41,1 | 32,3 | 17,8 | 8,6 | 0,3 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| SISBAHIA (ventos 5,34 m/s SW) | 35,9 | 38,7 | 23,0 | 2,2 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| Campanha nº 1 - Março 2007 | 25,6 | 38,0 | 26,4 | 8,1 | 1,8 | 0,2 | 0,0 | 100,0 |
| Campanha nº 2 - Abril 2007 | 33,6 | 35,1 | 18,7 | 9,4 | 3,0 | 0,1 | 0,0 | 100,0 |
| Campanha nº 3 - Maio 2007 | 20,8 | 27,7 | 22,0 | 18,9 | 7,0 | 2,5 | 1,2 | 100,0 |
| Campanha nº 4 - Junho 2007 | 20,4 | 35,1 | 28,4 | 12,5 | 3,2 | 0,2 | 0,1 | 100,0 |
| Campanha nº 5 - Julho 2007 | 22,0 | 28,2 | 24,3 | 18,5 | 6,4 | 0,5 | 0,0 | 100,0 |
| Campanha nº 6 - Agosto 2007 | 17,7 | 30,9 | 24,2 | 15,9 | 10,6 | 0,7 | 0,0 | 100,0 |
| Campanha nº 7 - Setembro 2007 | 8,9 | 20,7 | 30,6 | 26,8 | 10,8 | 1,9 | 0,3 | 100,0 |
| Campanha nº 8 - Outubro 2007 | 19,6 | 26,6 | 30,8 | 18,2 | 4,3 | 0,4 | 0,0 | 100,0 |
| Campanha nº 9 - Novembro 2007 | 26,7 | 32,8 | 19,3 | 13,8 | 5,8 | 1,6 | 0,0 | 100,0 |
| Campanha nº 10 - Dezembro 2007 | 19,9 | 27,1 | 27,7 | 16,5 | 6,3 | 2,3 | 0,2 | 100,0 |
| Campanha nº 11 - Janeiro 2008 | 20,1 | 31,5 | 27,2 | 14,2 | 6,2 | 0,8 | 0,0 | 100,0 |
| Campanha nº 12 - Fevereiro 2008 | 21,7 | 39,4 | 24,7 | 11,2 | 2,6 | 0,3 | 0,0 | 100,0 |
| Campanha nº 13 - Março 2008 | 28,8 | 41,1 | 22,8 | 6,6 | 0,7 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| Campanha nº 14 - Abril 2008 | 39,4 | 42,3 | 14,0 | 4,1 | 0,3 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| Campanha nº 15 - Maio 2008 | 36,7 | 36,3 | 15,8 | 6,4 | 2,5 | 1,8 | 0,6 | 100,0 |
| Campanha nº 16 - Junho 2008 | 26,4 | 33,5 | 19,8 | 13,6 | 4,5 | 1,5 | 0,7 | 100,0 |
| Média das campanhas | 24,3 | 32,9 | 23,5 | 13,4 | 4,8 | 0,9 | 0,2 | 100,0 |

4.2.4 Conclusão

Os dados de ventos, maré e correntes analisados mostram que as simulações feitas apresentam resultados condizentes com a situação real, já que os dados fornecidos pelo modelo computacional possuem comportamento semelhante aos dados medidos *in loco*.

4.3 Modelagem de Dispersão de Sedimentos

Conforme descrito na introdução, em primeiro lugar foram simulados a hidrodinâmica decorrente da atuação da maré no sistema envolvendo ciclo de sizígia e quadratura, com o intuito de se obter os níveis d'água e as velocidades das correntes. Como mencionado anteriormente, foram simulados dois cenários do modelo hidrodinâmico, um considerando apenas ventos de nordeste e o outro considerando apenas ventos de sudoeste. Nestas duas simulações foram utilizados ventos constantes ao longo do período de simulação e atuantes em toda a região do domínio do modelo

De posse dos resultados hidrodinâmicos, pôde-se simular a ressuspensão dos sedimentos durante a operação de dragagem. O material a ser transportado será proveniente da dragagem realizada em nova jazida de areia, como pode ser visto na Figura 4-15.

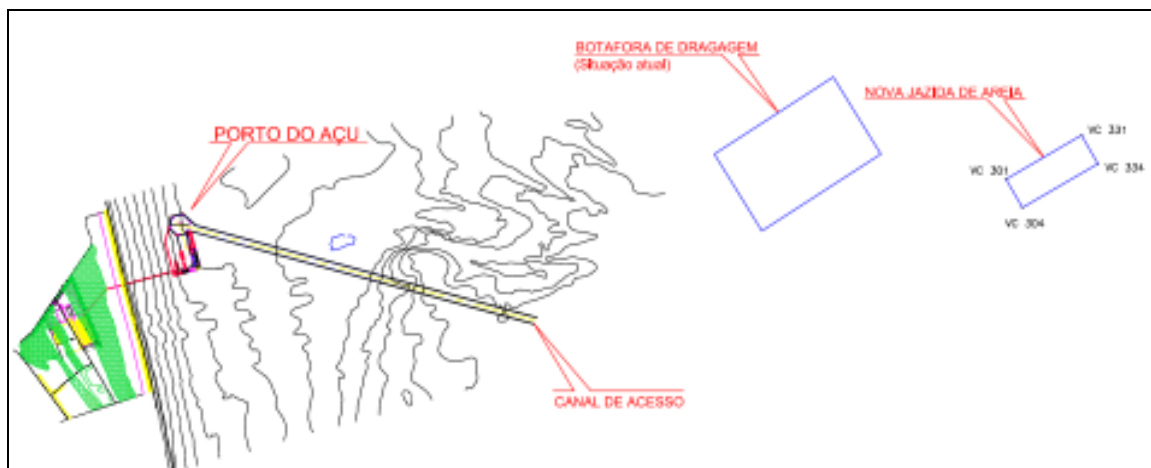


Figura 4-15: Nova jazida de areia

4.3.1 Considerações sobre a Modelagem Computacional

Conforme informações fornecidas, os sedimentos que serão utilizados para o aterro da região próxima ao porto de Açu serão provenientes de uma jazida de areia, de onde serão removidos

cerca de 4,0 milhões de m³ de sedimentos. Esta jazida tem área de 3,8 km² (1,2 km x 3,2 km) e as coordenadas de localização estão indicadas na Tabela 4-10.

Tabela 4-10: Localização da jazida de areia

| Vértice | UTM Leste (m) | UTM Norte (m) |
|----------------|--------------------------|--------------------------|
| VC 301 | 325.137 | 7.590.027 |
| VC 331 | 327.910 | 7.591.630 |
| VC 334 | 328.510 | 7.590.590 |
| VC 304 | 325.740 | 7.588.990 |

Além das características hidrodinâmicas locais, as características do sedimento influenciam sua dispersão e deposição. Assim, quanto mais fino for o material, maior será o tempo de sedimentação e maior será sua dispersão. Nesta nova jazida, considerou-se apenas a presença de areia de granulometria média a fina.

A dragagem deste material será realizada pela Draga Hopper XIN HAI HU, com capacidade de carga de 13.500 m³. Para a região de estudo, esta draga possui um ciclo de 360 minutos (6 horas), considerando os tempos médios de dragagem na área da nova jazida (40 minutos), do percurso (com draga carregada) da nova área até a monobóia (100 minutos), de conexão e aterro (90 minutos), de dragagem do canal de acesso (65 minutos), do percurso do canal até o bota-fora (30 minutos), de descarga no bota-fora (15 minutos) e do tempo médio de percurso do bota-fora (com draga descarregada) até nova área de jazida (20 minutos).

Observa-se, que durante o período de enchimento da cisterna, o material sólido dragado é depositado no fundo da mesma. Quando cheia, há o extravasamento para o mar, constituído de água e material sólido, especialmente a fração mais fina. Este processo comumente é chamado por “overflow”. Estima-se que cerca de 5% do volume de sedimentos arenosos dragados é colocado em suspensão na coluna d’água através deste processo.

A partir das informações acima descritas e da caracterização dos sedimentos na região, foi definida a simulação da dispersão dos sedimentos, sendo possível obter a pluma oriunda da

ressuspensão dos sedimentos (areia média a fina) gerada na operação de dragagem da nova jazida.

O modelo computacional aqui proposto simula, portanto, o comportamento da parcela do material arenoso em suspensão gerada durante a operação de enchimento da cisterna do equipamento, para as situações de ventos constantes a nordeste e constantes a sudoeste. O cenário proposto corresponde a um dia de trabalho de uma draga, contendo 4 ciclos de dragagem. Esta simulação teve início no período de sizígia, quando a influência da maré astronômica é mais intensa.

Foram adotados 4 pontos de dragagem ao longo da área da referida jazida, como forma de simular a operação do equipamento (estes pontos estão representados no detalhe da Figura 4-16).

Para o material arenoso adotou-se a concentração de 2.650 kg/m³. A velocidade de deposição das partículas de sedimentos foi calculada pela formulação proposta por Van Rijn (1984), abaixo descrita:

$$w_s = \frac{1}{18} \frac{(s-1)gD_s^2}{\nu}, \quad D_s < 100\mu m$$

$$w_s = 10 \frac{\nu}{D_s} \left\{ \left[1 + \frac{0,01(s-1)gD_s^3}{\nu^2} \right]^{0,5} - 1 \right\}, \quad 100\mu m < D_s < 1000\mu m$$

$$w_s = 1,1 \left[(s-1)gD_s \right]^{0,5}, \quad D_s > 1000\mu m$$

Os seguintes parâmetros são representados nas equações:

| | |
|---------|----------------------------------|
| $w_s =$ | velocidade de deposição |
| $s =$ | densidade dos sedimentos |
| $\nu =$ | viscosidade cinemática da água |
| $D_s =$ | diâmetro dos grãos de sedimentos |
| $g =$ | aceleração da gravidade |

Para o cálculo da velocidade dos sedimentos, foi considerado um diâmetro médio de 250 μ m, referente ao diâmetro médio de areia média a fina segundo classificação da Resolução CONAMA nº 344. Isto resultou numa velocidade de sedimentação de 0,0314 m/s.

4.3.2 Resultados do Modelo de Transporte

As figuras a seguir demonstram os resultados das simulações acima descritas, sendo apresentados na forma de isolinhas de concentração e na forma de ocorrência de plumas com concentração superior à concentração de 1 mg/l (0,001 kg/m³), valor este inferior à concentração média de sedimentos em oceanos e regiões costeiras, igual a 5 mg/l.

Observa-se nestas figuras, que a dispersão das plumas de sedimentos fica restrita basicamente à região da nova jazida de areia em ambas situações propostas, como esperado. A velocidade de queda da areia é considerada alta, fazendo com que o material arenoso fique poucos minutos em suspensão na água, não afetando, assim, áreas mais distantes do local da dragagem.

A Figura 4-16 apresenta a evolução temporal da concentração para o descarte de material arenoso após o 1º ciclo de dragagem considerando ventos de nordeste como constantes em toda região analisada (para melhor visualização, as manchas de concentração são mostradas em detalhe no canto esquerdo de cada período). Nesta figura, verifica-se que os sedimentos arenosos depositaram-se em pouco tempo, em praticamente 1 hora, não apresentando depois deste período concentração na coluna d'água. Observa-se, portanto, que a concentração dos sedimentos passa de 0,05 kg/m³ após 30 minutos do lançamento para cerca de 0,002 kg/m³ após 1 hora do descarte dos sólidos e, passadas apenas 1 hora e 5 minutos do início da dragagem, não há mais indicação da presença de material arenoso na coluna d'água. Devido ao baixo tempo de deposição, a pluma de sedimentos arenosos recebe pouca influência da maré atuante.

Os demais ciclos de dragagem se comportam de maneira bastante semelhante ao primeiro ciclo analisado, com completa deposição do material arenoso em cerca de 1 hora após início da operação do equipamento. Por este motivo, considerou-se desnecessária a ilustração destes

ciclos de dragagem. Assim, na sequência da Figura 4-17 a Figura 4-19, apresenta-se apenas a concentração de areia na coluna d'água logo após o fim da dragagem de cada ciclo. Verifica-se, portanto, que em todas as figuras a concentração de sedimentos transcorridos 40 minutos do início da dragagem fica entorno de $0,05 \text{ kg/m}^3$.

Em geral, os casos analisados possuem plumas de areia de cerca de $0,5 \text{ km}^2$ de área entorno do ponto de lançamento, com distância máxima entre o ponto mais distante e o ponto de dragagem de aproximadamente 500 m. Transcorrida 1 hora do início da operação, a pluma possui cerca de $0,25 \text{ km}^2$. Após 40 minutos do início do 2º ciclo de dragagem, a pluma apresenta uma área de aproximadamente $0,7 \text{ km}^2$. No ponto situado mais a sudeste da jazida de areia (Figura 4-18), a pluma de sedimentos arenosos é maior, com cerca de $1,0 \text{ km}^2$ de área e distância máxima ao ponto de lançamento de aproximadamente 1,0 km.

Para o cenário proposto com ventos constantes de sudoeste foi observado comportamento semelhante ao da situação acima descrita. Na Figura 4-20 é possível observar que a areia também se deposita em cerca de 1 hora após início da dragagem. Da mesma forma que a situação anterior, verifica-se que a concentração passa de cerca de $0,05 \text{ kg/m}^3$ após 30 minutos de dragagem para $0,002 \text{ kg/m}^3$ decorridos 1 hora do início de operação do equipamento.

Na sequência da Figura 4-21 a Figura 4-23 verifica-se que os demais ciclos de dragagem, considerando ventos constantes a sudoeste, se comportam da mesma forma que o primeiro ciclo analisado (apresentado na Figura 4-20), com concentração nestes instantes entorno de $0,05 \text{ kg/m}^3$. Assim como no 1º ciclo, a sedimentação completa da areia ocorreu em cerca de 1 hora.

Neste cenário, nota-se que no 1º ciclo analisado a pluma passa de $0,6 \text{ km}^2$, após 30 minutos do início da dragagem, para cerca de $0,8 \text{ km}^2$ após 40 minutos. Neste momento, a distância máxima ao ponto de dragagem é de cerca de 600 m. Transcorrida 1 hora do início da operação, a pluma tem cerca de $0,25 \text{ km}^2$ de área entorno do ponto de lançamento. No 2º ciclo, a pluma apresenta uma área de até $0,9 \text{ km}^2$ e distância máxima ao ponto de dragagem de cerca de 900 m. Os demais ciclos apresentam área de aproximadamente $0,5 \text{ km}^2$ e distância máxima ao ponto de dragagem de cerca de 500 m.

Na Figura 4-24 e na Figura 4-25, verifica-se a probabilidade de ocorrência de plumas de concentração referentes a um dia de dragagem para as situações de ventos a nordeste e a sudoeste, respectivamente. Nestas, observa-se que o transporte de sedimentos fica basicamente restrito ao local da jazida de areia, com probabilidade de ocorrência situada entre 0 e 5% em ambas as situações. Para a situação modelada para ventos de nordeste, a probabilidade de ocorrência da pluma compreende área de cerca de 17 km² e distância máxima ao centro da jazida de aproximadamente 3,5 km. Já para o cenário com ventos a sudoeste, a área é um pouco menor, cerca de 14,5 km², e a distância máxima ao centro da jazida de areia permanece a mesma, de cerca de 3,5 km.

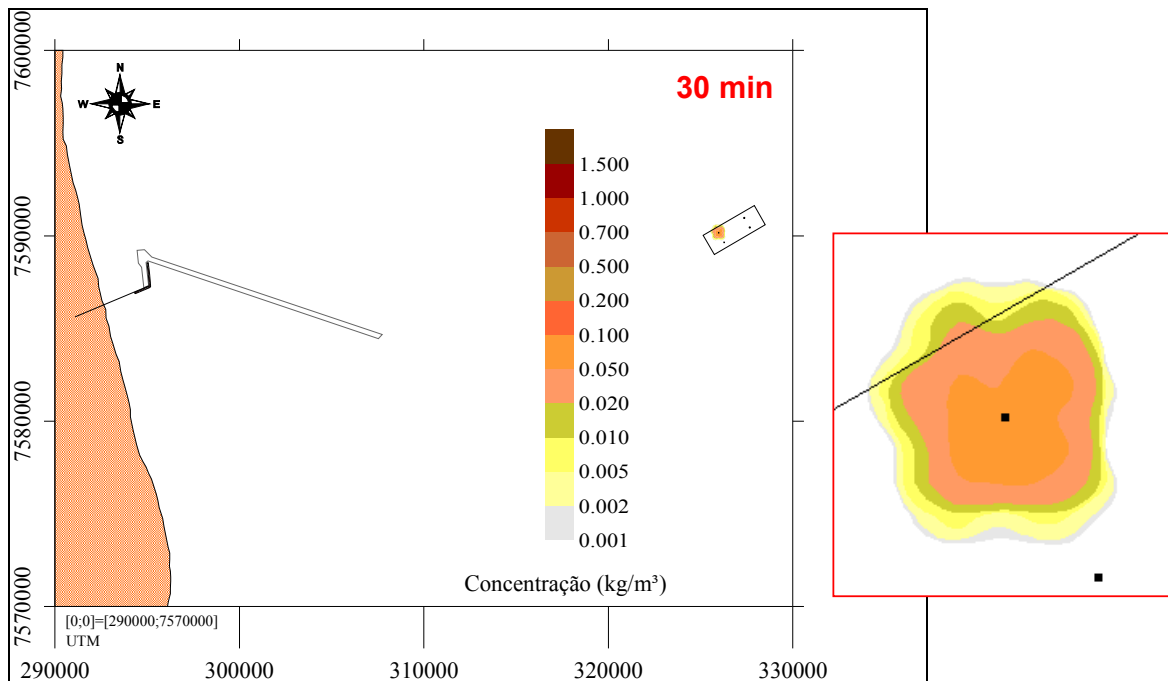


Figura 4-16: Evolução temporal da concentração da pluma de areia média a fina – ventos de 6,51 m/s NE

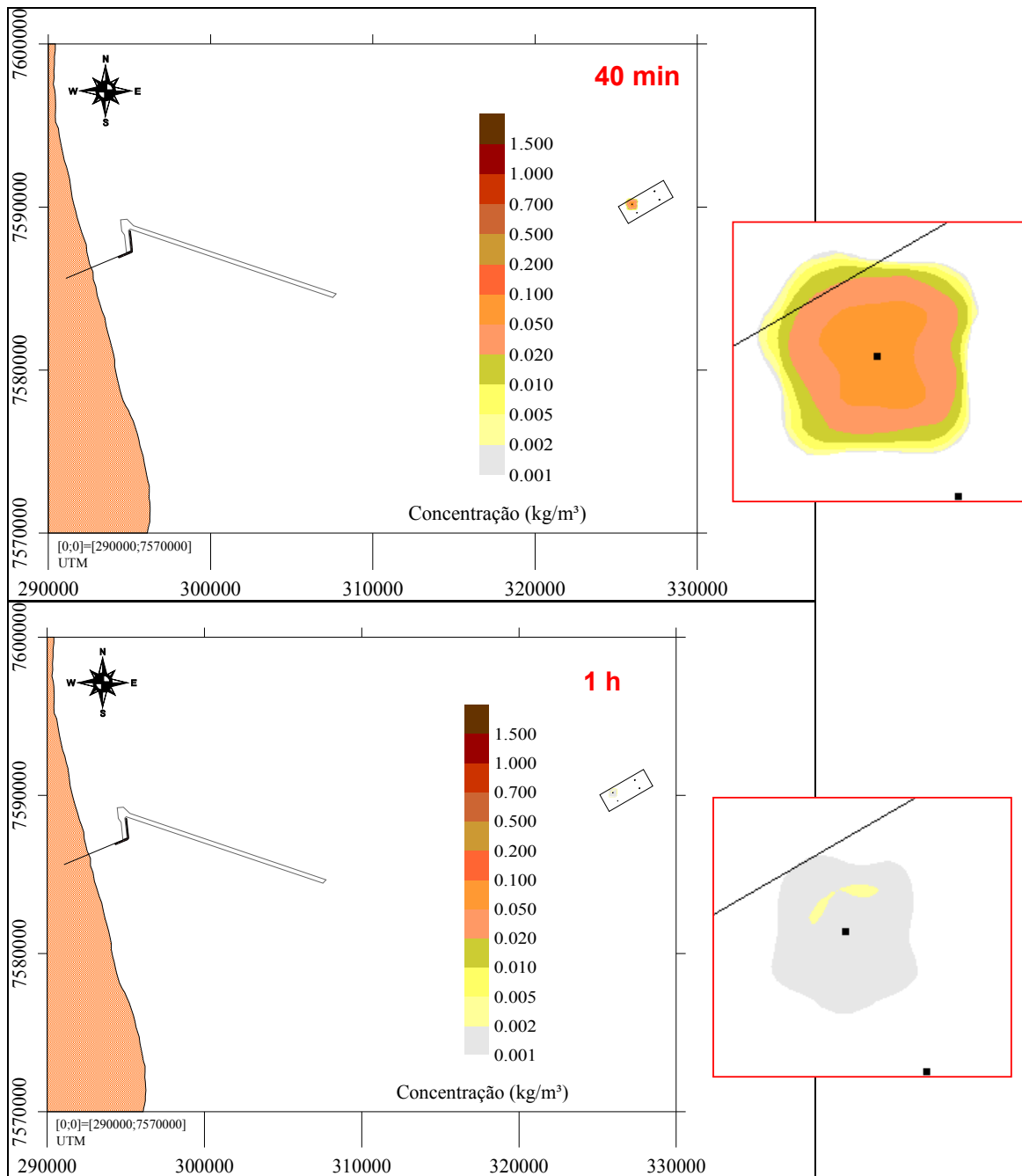


Figura 4-16: Evolução temporal da concentração da pluma de areia média a fina – ventos de 6,51 m/s NE (continuação)

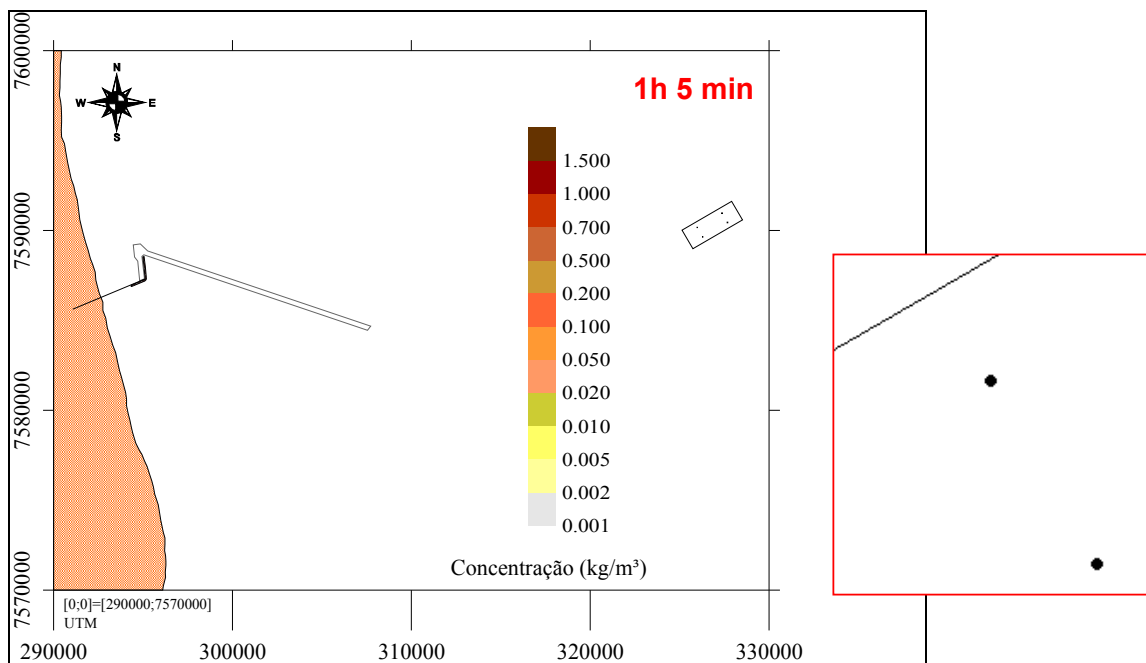


Figura 4-16: Evolução temporal da concentração da pluma de areia média a fina – ventos de 6,51 m/s NE (continuação)

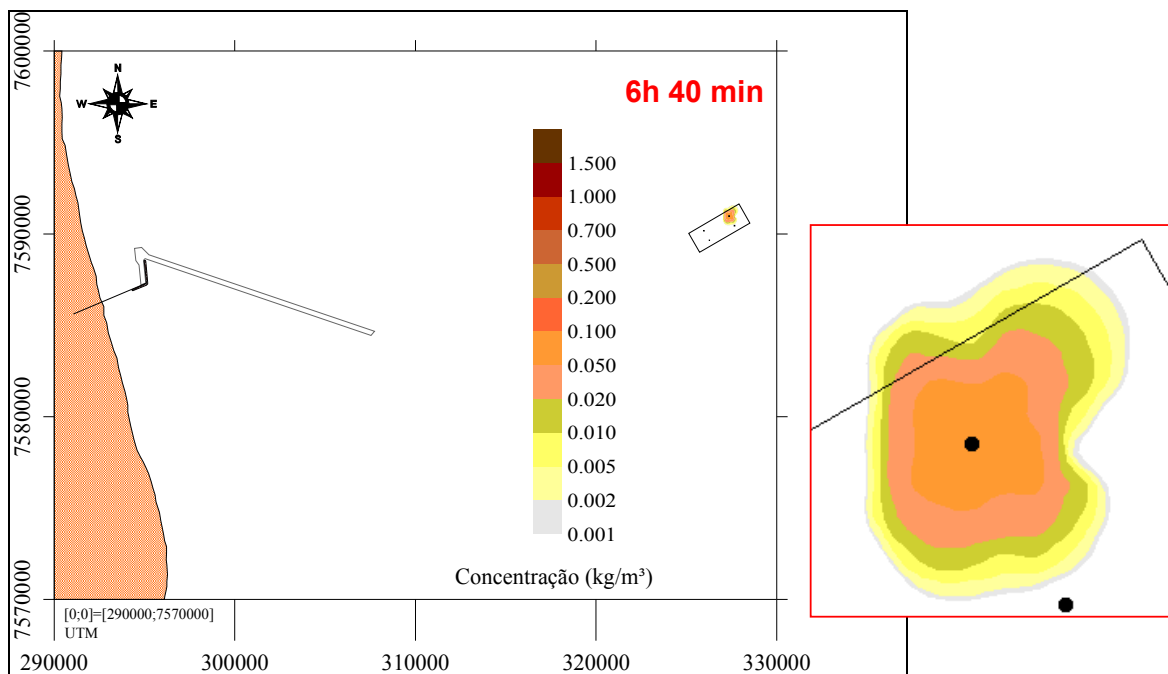


Figura 4-17: Momento após dragagem na nova jazida de areia(ventos de 6,51 m/s NE) – 2º Ciclo de dragagem

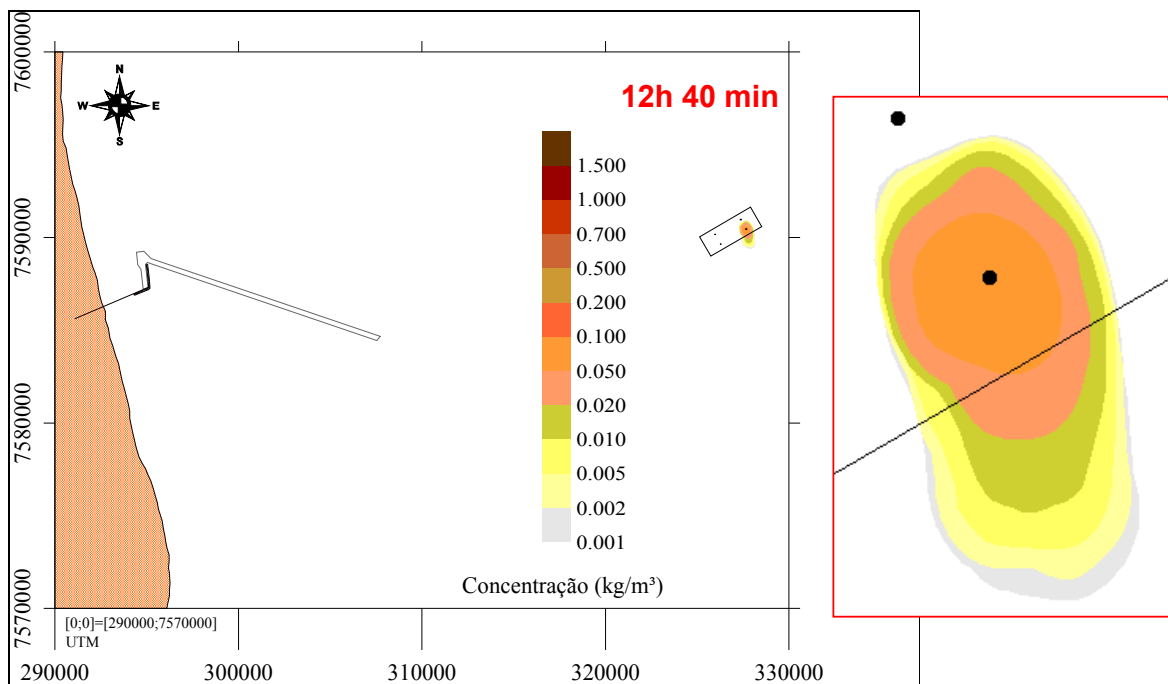


Figura 4-18: Momento após dragagem na nova jazida de areia (ventos de 6,51 m/s NE) – 3º Ciclo de dragagem

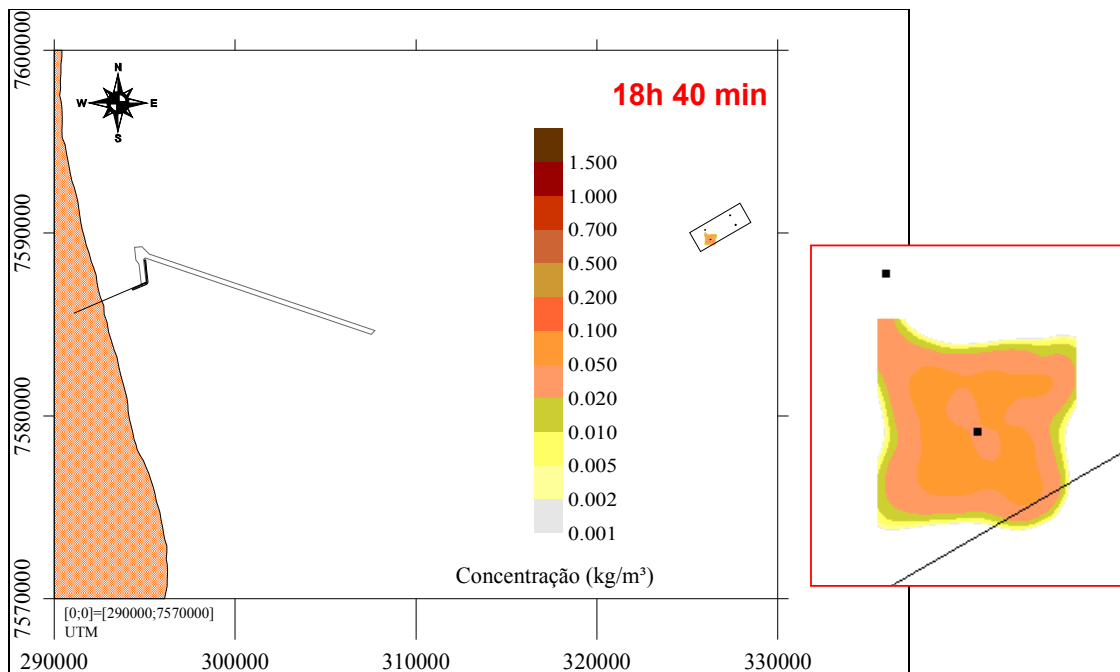


Figura 4-19: Momento após dragagem na nova jazida de areia(ventos de 6,51 m/s NE) – 4º Ciclo de dragagem

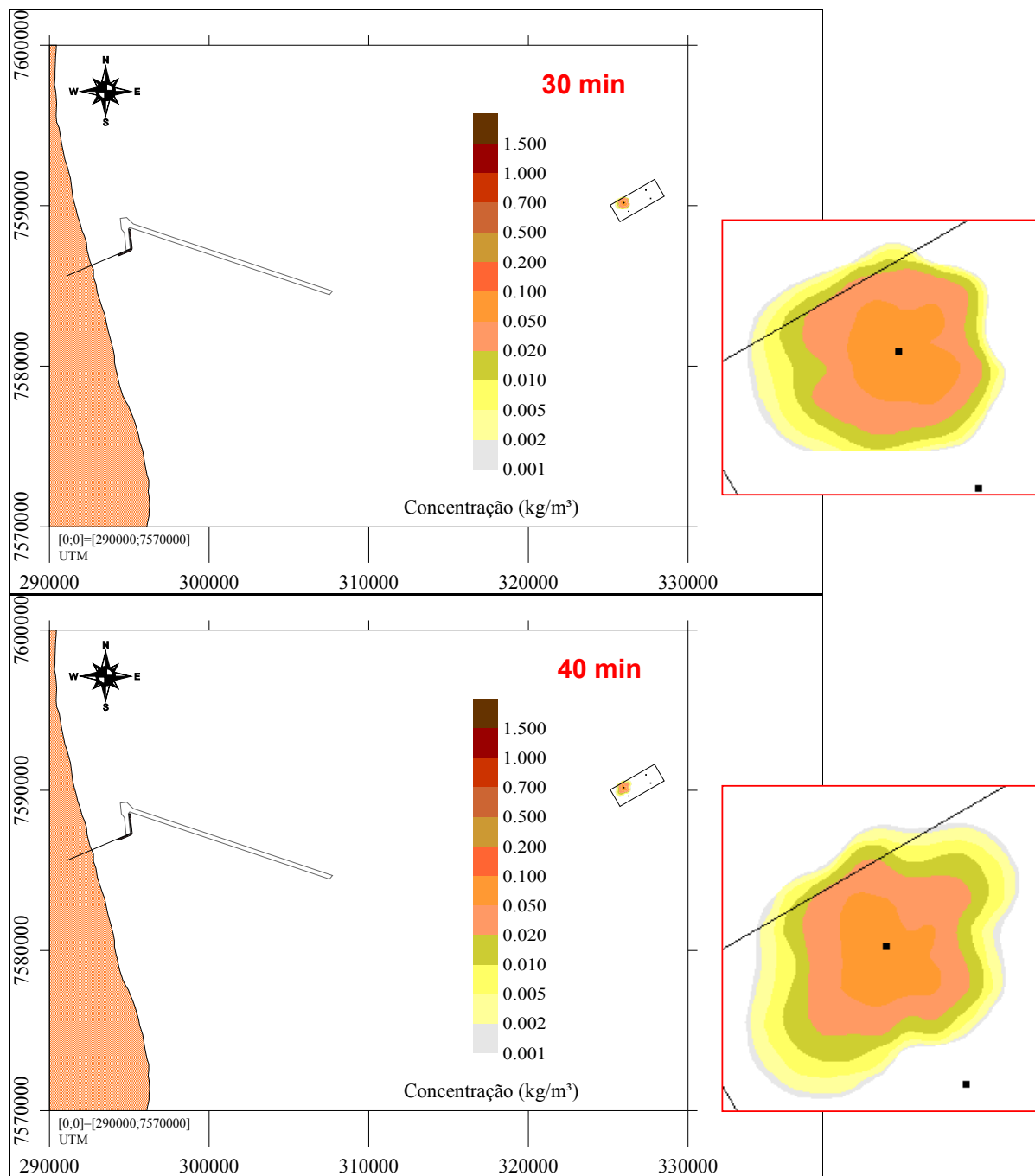


Figura 4-20: Evolução temporal da concentração da pluma de areia média a fina – ventos de 5,34 m/s SW

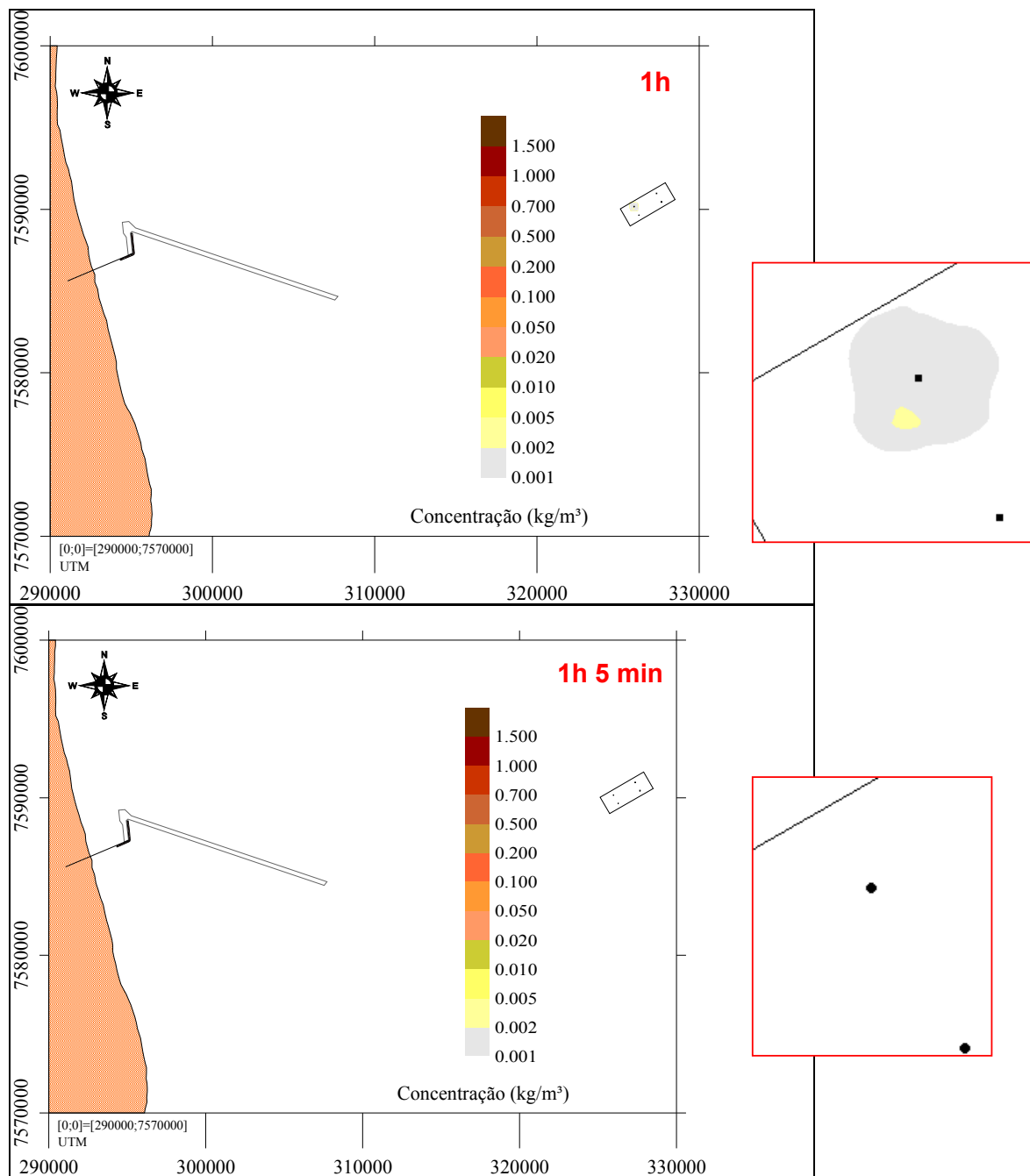
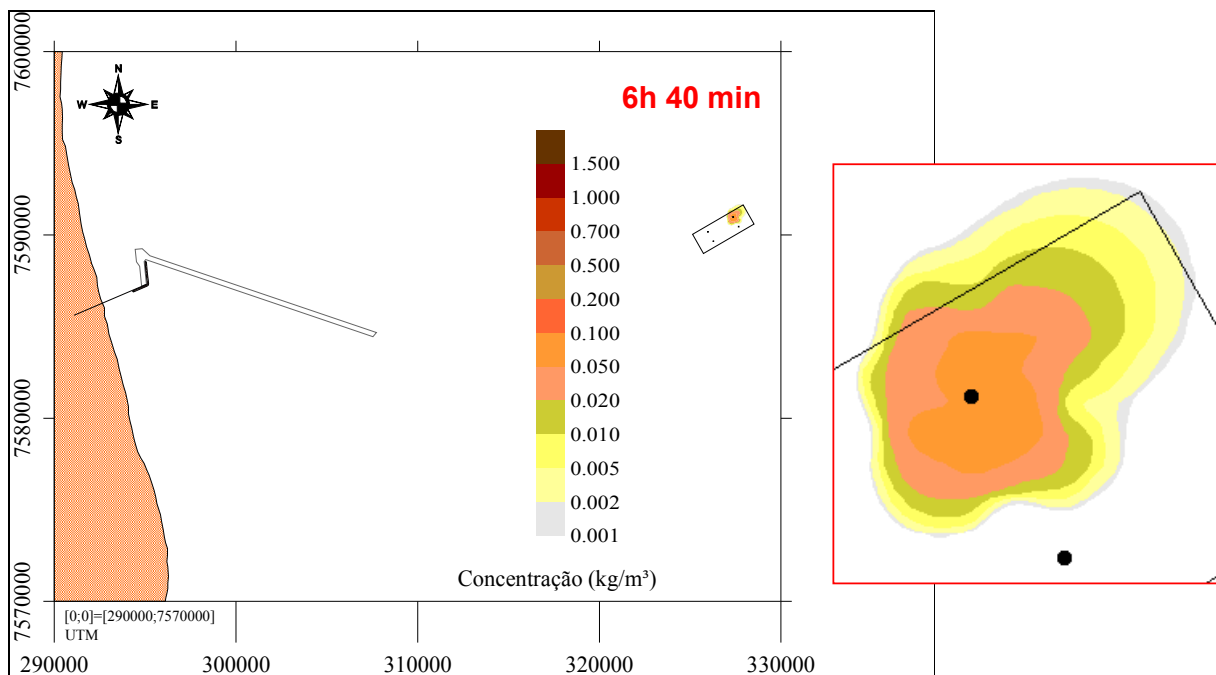
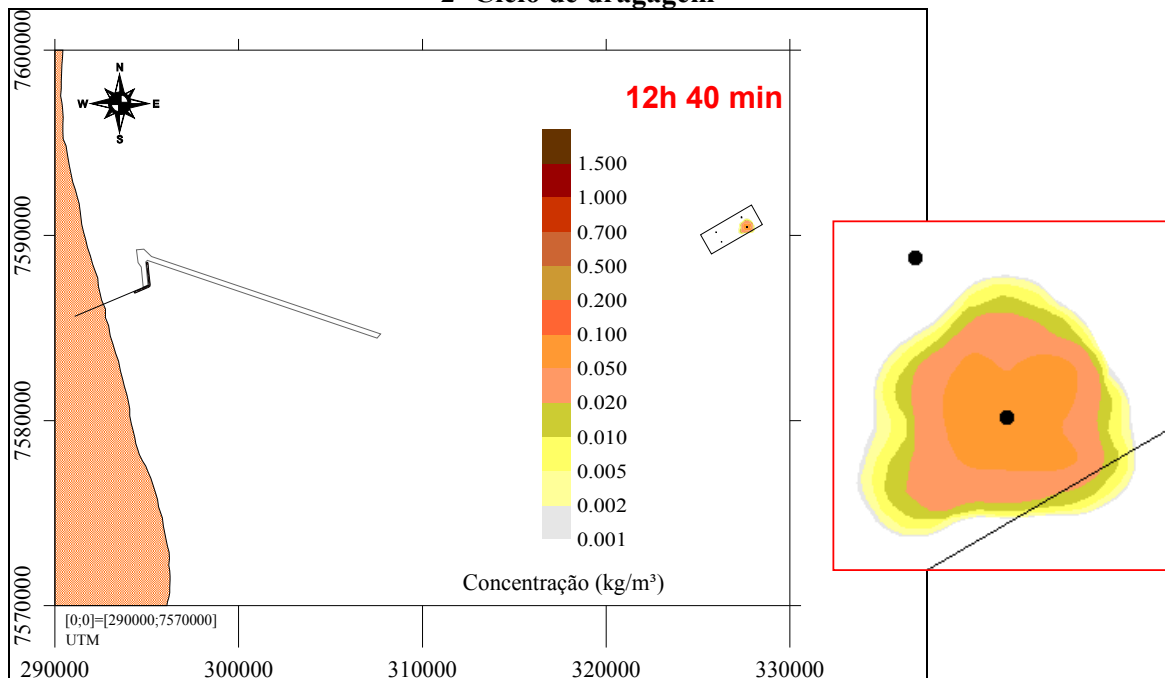


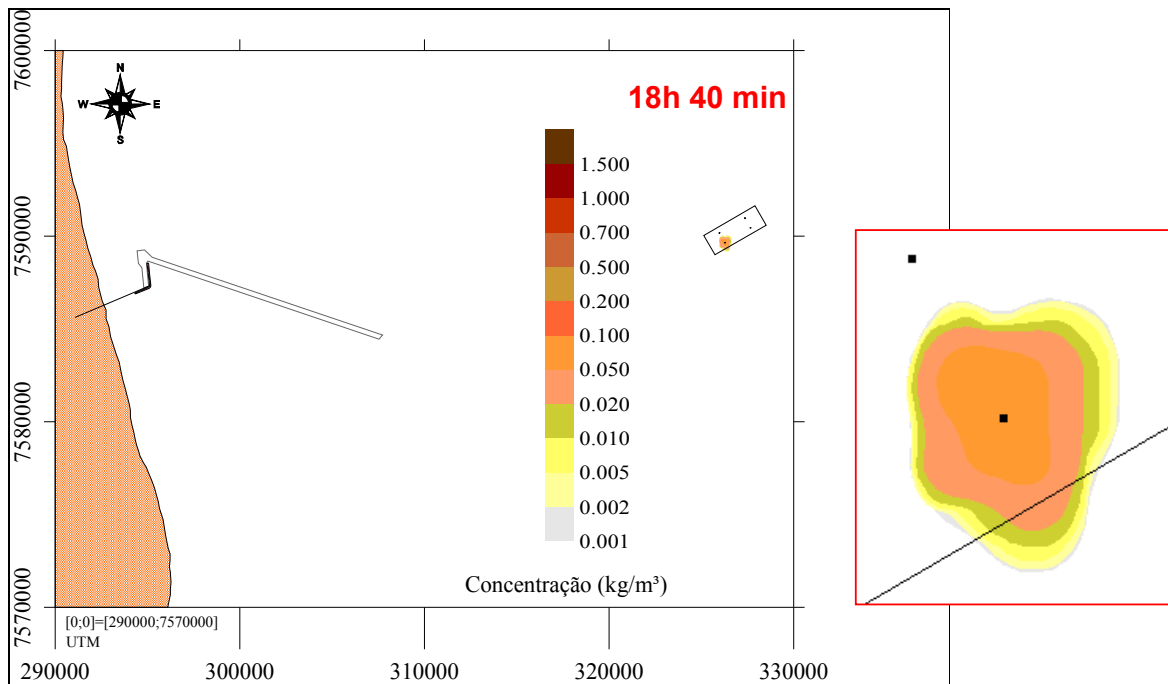
Figura 4-20: Evolução temporal da concentração da pluma de areia média a fina – ventos de 5,34 m/s SW



**Figura 4-21: Momento após dragagem na nova jazida de areia (ventos de 5,34 m/s SW)–
2º Ciclo de dragagem**



**Figura 4-22: Momento após dragagem na nova jazida de areia (ventos de 5,34 m/s SW)–
3º Ciclo de dragagem**



**Figura 4-23: Momento após dragagem na nova jazida de areia (ventos de 5,34 m/s SW)–
4º Ciclo de dragagem**

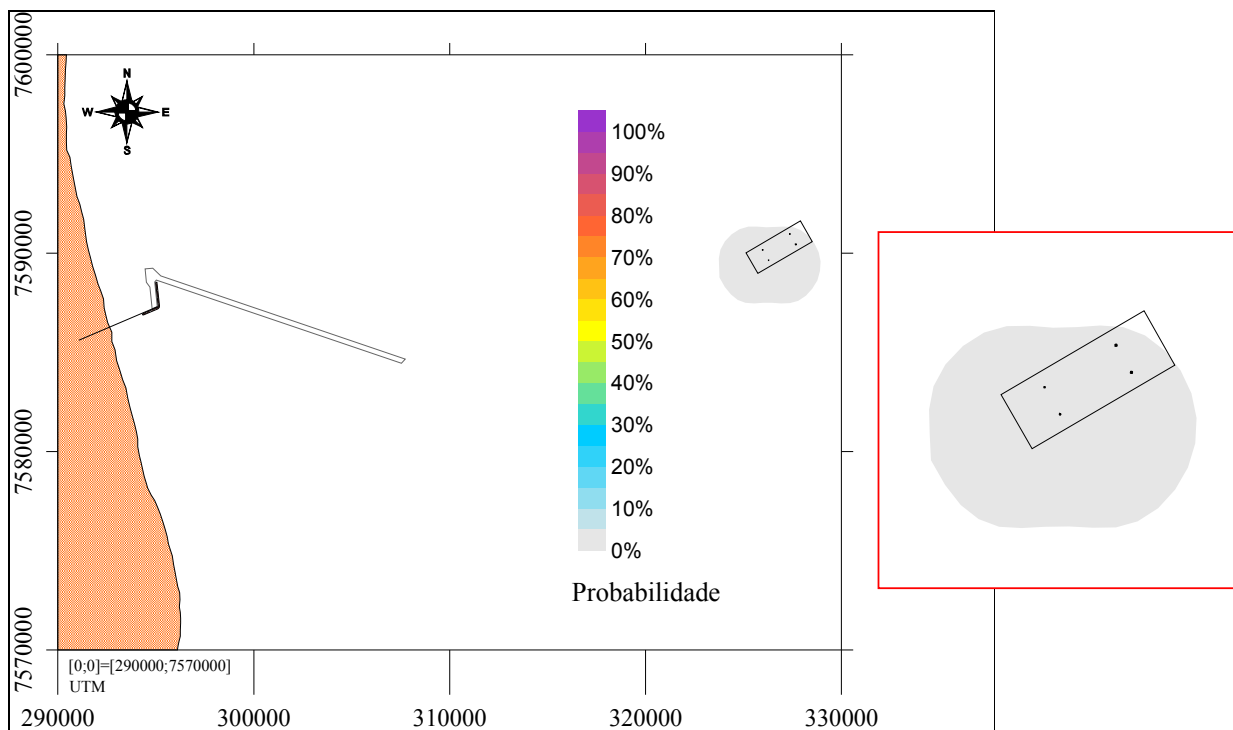


Figura 4-24: Probabilidade de plumas de areia média a fina(ventos de 6,51 m/s NE)

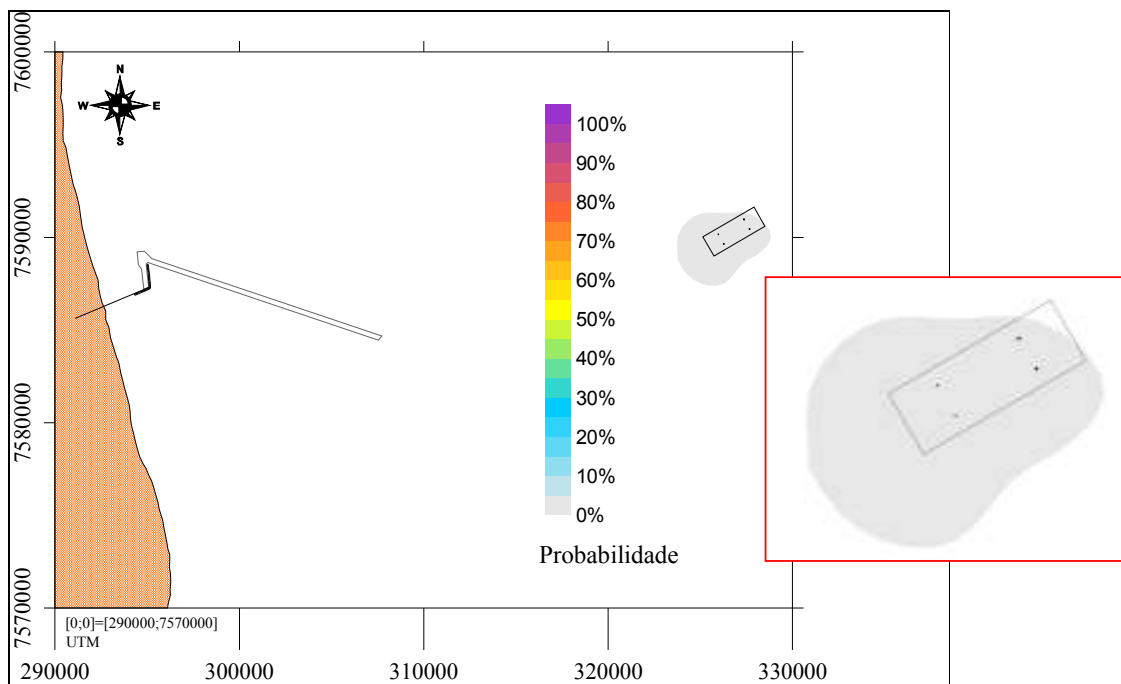


Figura 4-25: Probabilidade de plumas de areia média a fina (ventos de 5,34 m/s SW)

4.3.3 Conclusões

Os resultados acima descritos indicam que a dispersão das plumas de sedimentos fica restrita basicamente à região da nova jazida de areia, tanto na situação para ventos de nordeste, quanto para ventos de sudoeste.

Observou-se que as plumas de areia possuem área entre cerca de 0,25 km² a 1,0 km² entorno do ponto de lançamento, dependendo do local onde está sendo feita a dragagem ou do tempo transcorrido ao início da dragagem. Em geral, após 40 minutos do início da dragagem, a pluma de sedimentos apresenta as maiores áreas entorno do ponto analisado. As maiores plumas de sedimentos arenosos foram observadas após 12h 40 minutos do início da dragagem, considerando ventos de nordeste, e após 6 h e 40 minutos para o cenário utilizando ventos a sudoeste, possivelmente devido à dinâmica de correntes nestas regiões.

Em todas as simulações analisadas verificou-se um rápido período de deposição da pluma, de cerca de 1 hora, não apresentando depois deste período concentração de areia na coluna d'água. Este comportamento é característico dos sedimentos arenosos, pois sua velocidade de sedimentação é considerada alta, resultando num curto período em suspensão na água. Sendo assim, a pluma de areia se deposita rapidamente, não afetando áreas mais distantes do local da dragagem.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOT, M. B., BASCO, D. R., 1989, *Computational Fluid Dynamics, an Introduction for Engineers*. Logan Group, UK Limited.
- FEMAR, 1996. Levantamento do estado da arte da pesquisa dos recursos vivos marinhos do Brasil – Volume 13. Rio de Janeiro.
- FEMAR, 2000. Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras. 1ª Edição. Rio de Janeiro.
- LABORATÓRIO DE HIDROLOGIA E ESTUDOS DO MEIO AMBIENTE DA COPPE/UFRJ – LABHID, 2002. *Balanço entre disponibilidade e demandas futuras dos recursos hídricos, em quantidade e qualidade, com indicação de conflitos potenciais. Plano de Recursos Hídricos para a fase inicial da Cobrança na Bacia do Rio Paraíba do Sul*, v. 3, Rio de Janeiro. Relatório PGRH-RE-010-R0: Fundação COPPETEC/ANA, 282p.
- MARINHA DO BRASIL. Departamento de Hidrografia e Navegação (DHN). Carta Náutica Nº 1400 – do Rio Doce ao Cabo de São Tomé. 1941.
- MARINHA DO BRASIL. Departamento de Hidrografia e Navegação (DHN), 2006. Tábua das marés para 2006.
- ROSMAN, P. C. C. & GOBBI, E. F., 1990. “A Self-Adjusting Subgrid “Turbulence” Model for Shallow Water Flow”. *XI Congresso Latino Ibero Americano sobre Métodos Computacionais para Engenharia*, Rio de Janeiro, Out/1990.
- ROSMAN, P. C. C., 2001, “Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental”. In: *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 5*, Capítulo 1, Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH.
- VAN RIJN, L. C. 1984. Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*. 110(10):1613-1641.
- WU, J., 1982, “Wind Stress Over Sea Surface from Breeze to Hurricane”, *Journal of Geophysical Research*, 87 (C12), pp. 9704-9706.