

MODELAÇÃO NUMÉRICA DA CIRCULAÇÃO DE CORRENTES DE MARÉ E INDUZIDAS PELO VENTO NA REGIÃO COSTEIRA DA PRAIA GRANDE – SÃO PAULO

Silene Cristina Baptistelli¹; Rodrigo Nogueira de Araújo²; Paolo Alfredini².

¹*Engenheira Civil Sanitarista, Mestre em Engenharia Hidráulica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Av. Imirim, 1823 – CEP 02465-200, Fone: +55 11 6239-6980, e-mail: sbaptistelli@uol.com.br*

²*Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - LHEPUSP, Av. Prof. Lúcio Martins Rodrigues, 120, CEP 05508-900, Fone: +55 11 3039-3244, Fax: +55 11 3039-3266, rodrigo.araujo@poli.usp.br, alfredin@usp.br, paolo.alfredini@poli.usp.br*

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a caracterização da hidrodinâmica das águas do litoral da Praia Grande, a partir da compilação e análise dos dados de correntes existentes e da aplicação de modelagem computacional, o modelo MIKE 21 HD, a fim de fornecer subsídio a estudos de dispersão na disposição oceânica de efluentes. O modelo hidrodinâmico MIKE 21 HD é um sistema de modelagem numérica para simulações das variações do nível e fluxo d'água em estuários, baías e áreas costeiras. Os resultados das simulações de calibração apresentam boa correlação com os dados observados em campo, garantindo assim confiabilidade na previsão de correntes de projeto.

ABSTRACT

The main purpose of this paper is the characterization of the marine hydrodynamics of Praia Grande coast, by analyzing the current data and computer model application, MIKE 21 HD, in order to provide information for dispersion studies in submarine outfall disposal. The hydrodynamical model MIKE 21 HD is a general numerical modeling system for the simulation of water levels and flows in estuaries, bays and coastal areas. The calibration simulations results presents a good correlation with the survey observed data, giving liability in forecasting of design currents.

Palavras-Chave: modelação numérica; circulação de correntes; hidráulica marítima; dispersão de efluentes

1. INTRODUÇÃO

Atualmente grande parte da população mundial vive nas regiões situadas a até 100 quilômetros das zonas costeiras, o que representa uma enorme pressão sobre a natureza, visto que os mares e oceanos tem sido utilizados, acidentalmente ou proposadamente, como corpos receptores de esgotos sanitários e resíduos em geral. Sem dúvida é necessário proteger os mares e oceanos, bem como toda a atividade biológica neles contidos, contra os efeitos deletérios dos detritos produzidos pelo homem. No entanto, é inerente à civilização humana a produção de resíduos, cabendo à Engenharia Sanitária tratar e dispor estes resíduos de maneira a minimizar os impactos à natureza e aos recursos naturais.

Os mares e oceanos podem ser tratados, dentro da Engenharia Sanitária, como corpos receptores de efluente através dos Sistemas de Disposição Oceânica (SDO), que lançam os efluentes por emissários submarinos de esgotos. O conhecimento da hidrodinâmica costeira, no tocante às correntes marítimas se faz necessário quando se pretende estudar a dispersão de efluentes no ambiente marinho. Os modelos numéricos são uma alternativa viável para se determinar a hidrodinâmica marítima, mas precisam dos dados físicos coletados em campo para a sua inicialização e calibração. Os modelos numéricos e os dados coletados no campo se completam, pois através dos modelos é possível sintetizar as informações coletadas em campo e são ferramentas importantes para análise destes dados.

Cabe lembrar que a importância do conhecimento da hidrodinâmica do ambiente oceânico, no tocante às correntes marítimas, não se limita à fase de projeto do sistema de disposição oceânica ou estudos de dispersão. Ten-

do-se a área de interesse modelada, o empreendedor terá uma excelente ferramenta de base para o planejamento e gestão de sistemas costeiros. Gestão esta que envolve a operação do emissário submarino na disposição oceânica de efluentes, a elaboração de planos de contingência e a aplicação em situações emergenciais no caso de acidentes envolvendo o próprio emissário ou qualquer outro tipo de descarte ou derrame no mar.

Para a região metropolitana da Baixada Santista, que inclui a área de estudo do presente trabalho, no tocante à modelagem numérica, podem ser citados os seguintes trabalhos já desenvolvidos: HARARI E CAMARGO, (1998) implementaram o modelo POM (Princeton Ocean Model) para a região costeira de Santos (46° - 47°W, 23°40' - 24°30' S); a UNISANTA (1999) vem desenvolvendo desde 1995 estudos de circulação oceânica utilizando o modelo MOHID; HARARI, CAMARGO E CACCIARI, (2000) apresentaram os resultados das simulações tridimensionais das correntes de maré na Baixada Santista, através do POM. No que se refere à utilização do modelo MIKE 21, podem ser citados alguns trabalhos recentes: SHOU E VIEIRA (1999), que apresenta a aplicação do MIKE 21 em estudos de impacto ambiental em sistemas costeiros de Portugal; e OZCAN E GOKE (2002), que apresenta algumas aplicações do modelo nos projetos de emissários submarinos da Turquia.

Dentro deste contexto científico, este trabalho visa a implementação do modelo hidrodinâmico MIKE 21 HD, que é um sistema de modelagem numérica para simulações de variações do nível e fluxo d'água em estuários, baías e áreas costeiras em geral, através das simulações de correntes de maré e induzidas pelo vento. Portanto, o objetivo geral deste trabalho é a caracterização da hidrodin-

nâmica das águas do litoral da Praia Grande, a partir da compilação e análise dos dados de correntes existentes e da aplicação de modelagem computacional, a fim de fornecer subsídio a estudos de dispersão de efluentes, no que tange ao campo afastado.

A região denominada por Praia Grande compreende os municípios de Praia Grande, Mongaguá, Itanhaém e Peruíbe e faz parte de uma planície costeira que apresenta praias retílineas e extensas (Figura 1) do Estado de São Paulo. A proximidade do maior porto brasileiro (Porto de Santos), do maior pólo industrial brasileiro, faz da região de estudo um núcleo de crescimento urbano.

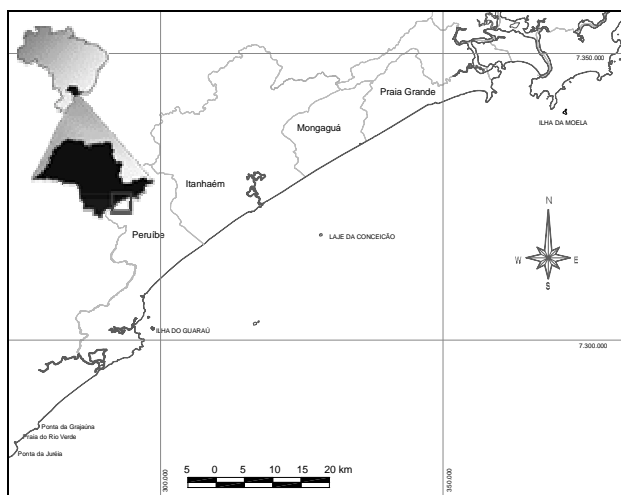


Figura 1 – Mapa da área de estudo

2. PROCESSOS HIDRODINÂMICOS

Só é possível compreender a dinâmica dos oceanos, ou seja, a natureza das marés, correntes e das misturas oceânicas através do conhecimento de suas propriedades físico-químicas e dos padrões de periodicidade dos oceanos. Um entendimento básico da meteorologia costeira e marítima também é um importante componente nos projetos e planejamento em áreas costeiras e ao largo.

Quanto à meteorologia, o aspecto mais relevante é o vento, por ser um importante fator meteorológico relacionado aos processos hidrodinâmicos, pois contribui para alterar as condições oceanográficas.

As ondas constituem o principal agente modelador da costa pelo transporte de sedimentos que promovem, bem como produzem muitas das forças às quais as estruturas marítimas estão submetidas. O estudo das ondas é importante para o período de execução do emissário submarino, no entanto na fase de estudos de dispersão este efeito tem pouca importância, podendo ser desprezado.

O entendimento dos principais processos envolvidos na geração e propagação das marés oceânicas é fundamental para a utilização de programas de simulação hidrodinâmica. Sendo as marés caracterizadas pela variação periódica do nível do mar sob a influência de forças astronômicas é possível analisar e prever seus efeitos considerando a soma de um número finito de constituintes harmônicas, cujas velocidades angulares e fases são determinadas a partir de argumentos astronômicos. Segundo MESQUITA & HARARI, 1983 (APUD HARARI & CAMARGO, 1994),

as 9 principais componentes que representam mais de 90% do efeito de maré na área da plataforma sudeste brasileira são: M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1 e M3. A maré é acentuadamente afetada pelas condições meteorológicas. A maré meteorológica é a diferença entre a maré observada (real) e aquela prevista.

Um dos mais notáveis aspectos do comportamento dos oceanos é o movimento constante das águas pela ação das correntes marinhas. As forças atuantes podem ser de origem externa (vento e força astronômica), interna (gravidade e pressão) e forças induzidas (atrito interno, força de Coriolis e atrito no fundo em reduzidas profundidades). Portanto, as correntes são geradas por diversos mecanismos, os quais têm escalas espaciais e temporais muito variadas o que dificulta o entendimento dos processos físicos que atuam na dispersão de efluentes. Isso confirma a importância do estudo do campo de correntes para a análise do padrão de circulação costeira.

3. DISPOSIÇÃO OCEÂNICA DE ESGOTOS SANITÁRIOS

Conforme a edição sobre sistemas de disposição oceânica da revista WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY (1992), a disposição de esgotos domésticos e industriais no ambiente marinho é uma das opções mais seguras para as populações das cidades litorâneas, desde que os esgotos passem por um tratamento prévio adequado, que o Sistema de Disposição Oceânica (SDO) tenha um projeto devidamente estudado e que o emissário seja adequadamente localizado.

O sistema de disposição oceânica deve aproveitar a capacidade do oceano para promover a difusão, diluição, dispersão e decaimento bacteriano das cargas poluentes e contaminantes lançados nos oceanos, com o objetivo de evitar efeitos negativos ao meio ambiente e riscos à saúde humana. Um SDO é composto de: estação de pré-condicionamento, emissários terrestre e submarino e tubulação difusora ou trecho difusor.

As possibilidades de se obter um prognóstico eficiente das condições de poluição depende diretamente da determinação das condições marítimas prevalentes na área de estudo. Os padrões da circulação e transporte das águas litorâneas são influenciadas pela combinação de diversos fatores como os ventos, as ondas e sua arrebatção, as marés, as correntes oceânicas, a batimetria, a estrutura vertical de densidade, a contribuição das bacias fluviais costeiras, etc.

Portanto, fica evidenciada a importância dos estudos hidrográficos e a necessidade da caracterização hidrodinâmica do ambiente para os sistemas de disposição oceânicas.

4. METODOLOGIA

4.1 Base de Dados e especificações para os processamentos

A base de dados batimétricos utilizada foi elaborada a partir das Folhas de Bordo fornecidas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (ALFREDDINI E COL., 2002), que são elementos cartográficos de maior detalhamento dos fundos marítimos costeiros disponíveis em escala para estudos conceituais. A base batimé-

trica é de fundamental importância em projetos de obras na Zona Costeira, como os emissários submarinos.

Na etapa referente ao preparo da base de dados de correntes marítimas procurou-se compilar todos os dados de medições de corrente disponíveis para a região de estudo. Os dados foram extraídos de relatórios das seguintes fontes: FUNDESPA - Fundação de Estudos e Pesquisas Aquáticas; SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo; HIDROCONSULT - Consultoria, Estudos e Projetos Ltda.; NUCLEBRÁS - Empresas Nucleares Brasileiras; UNISANTA - Universidade Santa Cecília e CODESP - Companhia Docas do Estado de São Paulo.

Para as condições de contorno das bordas abertas foi especificada a variação temporal e espacial do nível d'água através da variação da maré conforme previsão efetuada pelo MIKE 21, utilizando os valores de fase e amplitude das 9 principais constituintes de maré, estudadas por HARARI e CAMARGO (1994).

Os dados de vento utilizados na modelagem foram obtidos junto à Diretoria de Hidrologia e Navegação da Marinha do Brasil - DHN, a partir do Banco Nacional de Dados Oceanográficos - BNDO. Os dados foram coletados na estação meteorológica Rádio Farol Ilha da Moela n.º 83599, medidos a cada 6 horas.

Na Figura 2 são apresentados os pontos de medição de correntes, maré e ventos utilizados na elaboração da base de dados.

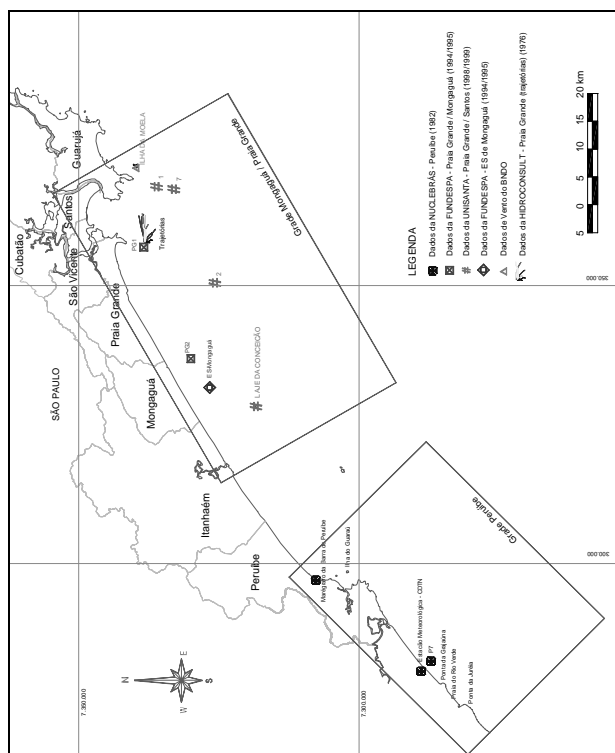


Figura 2 – Localização dos pontos de estudo e das grades batimétricas

4.2 Descrição Geral do Modelo Computacional MIKE 21 HD

O modelo hidrodinâmico do MIKE 21, desenvolvido pela DHI - DANISH HYDRAULIC INSTITUTE WATER & ENVIRON-

MENT, é um sistema de modelagem numérica para simulação das variações do nível e fluxo d'água em estuários, baías e áreas costeiras em geral. Simula fluxos variáveis em duas dimensões em um nível verticalmente homogêneo.

O modelo possui módulos de pré-processamento de dados e pós-processamento de resultados, possibilitado que a entrada de dados seja feita de modo interativo e de fácil compreensão, assim como, fornecendo resultados claros e de fácil interpretação. O modelo também possui um módulo de previsão e análise de marés.

A utilização deste modelo está sendo disponibilizada por meio de uma Licença Educacional para o Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade São Paulo, sob o número BRA-M21-LIT-2001-01, fornecida pelo DANISH HYDRAULIC INSTITUTE - DHI WATER & ENVIRONMENT, tendo sido utilizada especificamente neste caso para a elaboração da Dissertação de Mestrado de BAPTISTELLI (2003).

A descrição da batimetria é uma das mais importantes tarefas no processo de modelagem. Os dados de batimetria devem ser inseridos numa grade batimétrica e para a escolha do espaçamento da grade deve-se levar em consideração o número de Courant, para que sejam evitados problemas de instabilidade. O MIKE 21 HD resolve as equações diferenciais parciais que governam o fluxo horizontal, sendo necessárias as condições de contorno. Para as condições de contorno pode-se escolher especificar o nível d'água e a direção do fluxo ou o fluxo total. Cabe lembrar que introduzir condições de contorno nas bordas abertas em um modelo de diferenças finitas é uma tarefa muito complexa. O coeficiente de viscosidade pode ser especificado como um valor constante, com uma variação espacial, ou em função de uma variação temporal baseada na formulação de Smagorinsky. As condições de vento podem ser especificadas como um vento constante, com uma variação temporal e constante no espaço, ou com uma variação temporal e espacial. O coeficiente de atrito do vento pode ser usado como parâmetro de calibração do modelo.

5. RESULTADOS

5.1 Previsão de Maré e Calibração do Modelo

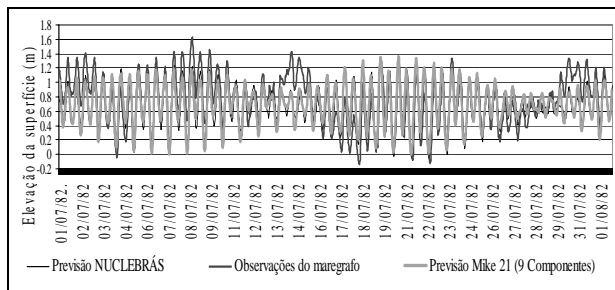


Figura 3 – Comparação entre as previsões de maré e as observações de campo

A Figura 3 apresenta a comparação entre os valores observados pelo marégrafo na Barra de Peruíbe com os resultados da previsão do MIKE 21. São apresentados também os valores da previsão da NUCLEBRÁS. Pode-se notar que os resultados de previsão de maré do MIKE 21

estão satisfatórios, havendo uma boa correlação entre as séries temporais, sendo o coeficiente de correlação para os valores previstos (MIKE 21) e os observados de 0,7212. Nos dias em que não houve boa correlação entre os valores observados com as previsões, pode-se inferir que houveram eventos hidrometeorológicos, sendo que estas previsões de maré consideram somente efeitos astronômicos.

No processo de calibração do modelo, variando o coeficiente de Manning para os valores de 20, 32 e 40 m^{1/3}/s, observa-se a pouca influência do parâmetro sobre os resultados das correntes de maré geradas pela simulação. Portanto, optou-se por manter o coeficiente de Manning igual a 32 m^{1/3}/s. O coeficiente de Smagorinsky também pouco influencia a resposta do modelo para as correntes, tanto na intensidade como no rumo. Portanto, optou-se por utilizar o número intermediário de 0,50. Com a introdução dos dados de ventos, procedeu-se à variação do coeficiente de atrito do vento com valores entre 0,0016 e 0,0120. Adotando-se o valor de 0,0100 para o coeficiente de atrito atingiu-se uma correlação entre a série temporal dos dados observados em campo e a série resultante da simulação superior a 70%. O valor médio da intensidade da velocidade foi atingido pela simulação, embora a intensidade máxima tenha ficado em 75% do valor observado. A Figura 4 mostra que foi atingido um bom nível de calibração para o Ponto 7 no período analisado.

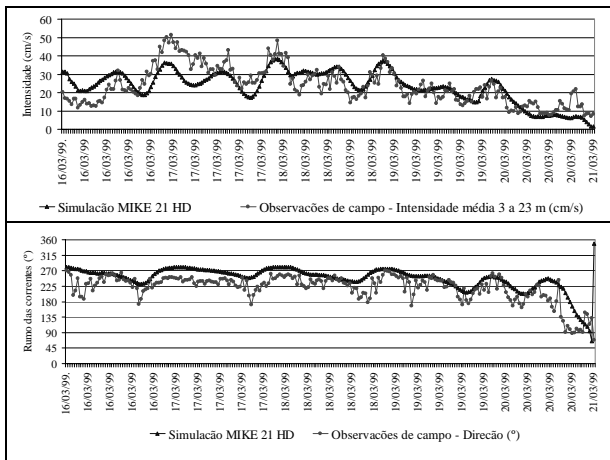


Figura 4 – Calibração das correntes – Ponto 7 - UNISANTA

5.2 Previsão de Correntes

Na Figura 5 é apresentado um mapa de correntes de maré referente a um período de sizígia no instante de uma vazante de maré, na grade de Peruíbe.

Na Figura 6 é apresentado um mapa de correntes de maré e induzidas pelo vento para o verão de 2000.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Base de Dados

A partir da base de dados foi possível analisar a dinâmica de circulação da região estudada. Se forem consideradas todas as campanhas de medições, a direção preferencial das correntes na Praia Grande é paralela à linha de costa, com rumos preferenciais Nordeste e Sudoeste.

No relatório da HIDROCONSULT de 1976 o rumo preferencial das correntes variou entre ENE e SSE com

rumos paralelos e divergentes à costa. Os dados do relatório HIDROCONSULT (1979) indicaram que em 68% do tempo as correntes foram divergentes ou paralelas à costa.

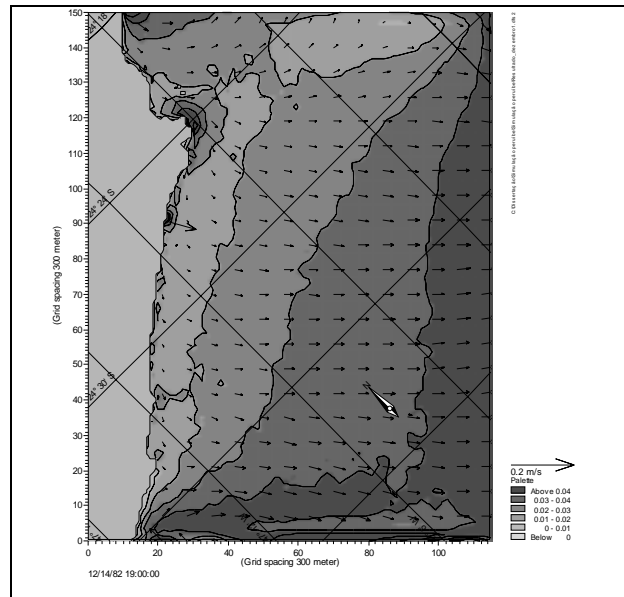


Figura 5 – Mapa de Corrente de maré – Peruíbe

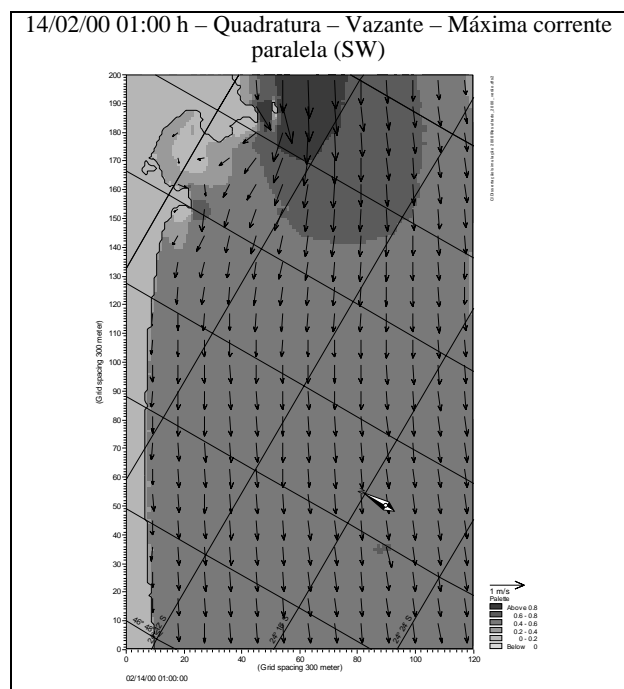


Figura 6 – Mapa de corrente de maré e induzidas pelo vento – Verão de 2000

Para as medições de corrente no ponto o rumo preferencial das correntes esteve entre E e SE, com o segundo rumo preferencial entre W e NW. No ponto PG2 as medições de corrente indicaram rumos preferenciais entre NE e E, seguidos dos rumos entre SW e W. Para ambos, PG1 e PG2, a corrente mais freqüente teve intensidade compreendida entre 5 e 15 cm/s.

As medições de corrente efetuadas em Peruíbe pela NUCLEBRÁS apresentam uma distribuição bimodal dos rumos, sendo que os predominantes concentraram-se em

torno dos rumos NE e SW. Observou-se que foi praticamente nula a influência da maré e ocorreu uma acentuada influência das frentes frias na orientação das correntes.

Nos dados das medições de correntes efetuadas pela UNISANTA, constatou-se uma tendência das correntes serem fortemente influenciadas pelo vento. Novamente, nota-se a distribuição bimodal dos rumos das correntes, concentrando-se nos octantes NNE-E e SW-W.

6.2 Previsão de Correntes

Os mapas de corrente de maré mostram claramente as vazantes e as enchentes de maré, no entanto não representam a dinâmica observada na região.

Nos mapas de correntes de maré e induzidas pelo vento pode-se notar que, independentemente do período de sizígia ou quadratura, ou do estado da maré (enchente ou vazante), a intensidade das correntes é pouco influenciada pela maré astronômica e a força do vento apresenta uma influência relevante na circulação hidrodinâmica na área de estudo.

Deve-se levar em consideração que os dados de entrada de vento não são dados ideais para representar toda a área de estudo, devido à localização da Ilha da Moela e aos efeitos orográficos que a área costeira proporciona. No entanto, o modelo apresentou resposta satisfatória à esta entrada de dados de vento, indicando que embora não sejam dados ideais, sua influência sobre a hidrodinâmica local é bem caracterizada.

Foram extraídos os resultados de intensidade e rumo das correntes para o ponto de lançamento previsto do emissário submarino de Mongaguá. Através de uma metodologia proposta foram determinadas as correntes de projeto para dimensionamento e para estudos de dispersão de um emissário submarino na região.

No caso da utilização da modelagem numérica, com o modelo devidamente inicializado e calibrado com as observações de campo, a adoção das correntes de projeto pode ser feita também com o fornecimento ao projetista das séries temporais de velocidade e rumo das correntes geradas pelas simulações. Assim, poderia ficar a critério do projetista o tratamento estatístico e a adoção de valores que fossem mais convenientes para os estudos de dispersão. Também seria possível a extração dos resultados em outras posições, e assim ter-se-ia uma avaliação da melhor localização para o ponto de descarga do emissário.

7. CONCLUSÕES

Cumprindo o objetivo da caracterização da hidrodinâmica das águas do litoral da Praia Grande, numa análise geral da base de dados, conclui-se que o rumo preferencial das correntes, na região da Praia Grande, foi paralelo à costa, considerando-se uma faixa que varia de 3 a 15 km de distância da linha de costa. No desenvolver do trabalho, e após analisar os relatórios consultados e os dados de medições de correntes pode-se concluir que a força do vento apresenta uma influência relevante na circulação hidrodinâmica na área de estudo. Os primeiros resultados das simulações e o processo de calibração do modelo vieram corroborar a conclusão descrita acima. A circulação

de maré astronômica não caracteriza a circulação da região de estudo.

O local analisado para o possível ponto de lançamento do Emissário Submarino de Mongaguá é favorável, no aspecto da hidrodinâmica local, para receber os efluentes domésticos do município de Mongaguá. Os rumos preferenciais das correntes são paralelos à linha da costa com as maiores velocidades de 90,91 cm/s com rumo entre SW-WSW e 72,85 cm/s com rumo entre NE-E. A velocidade máxima convergente prevista foi de 43,56 cm/s.

Com esta modelagem hidrodinâmica foi implementado um sistema de previsão de maré, de correntes de maré e induzidas pelo vento, através do Modelo Hidrodinâmico MIKE 21 HD. Este trabalho cumpriu uma etapa na implantação de sistemas de modelagem aplicados à disposição oceânica de efluentes na Praia Grande, fornecendo subsídios para estudos de dispersão em campo afastado. Um sistema de previsão completo deverá abranger, além do modelo de circulação hidrodinâmica, um modelo de qualidade da água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFREDINI, P. e col. Projeto de Preparo de Base Batimétrica Digitalizada para a Costa do Estado de São Paulo. Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Convênio DAEE-USP. 2002.
- BAPTISTELLI, S. C. – Modelação Numérica da Circulação de Correntes de Maré e Induzidas pelo Vento Aplicada a Estudos de Disposição Oceânica de Efluentes na Praia Grande – São Paulo. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da USP para obtenção do título de Mestre junto ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da EPUSP. São Paulo, 2003.
- FUNDESPA. Levantamento Oceanográfico da área diretamente afetada por efluentes dos Emissários de esgotos da SABESP, entre os municípios de São Sebastião e Mongaguá, Estado de São Paulo – Relatório Final. 1999.
- HARARI, J.; CAMARGO, R. Simulação da propagação das nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira através de modelo numérico hidrodinâmico. Boletim do Instituto Oceanográfico, São Paulo, 42(1): 35-54, 1994.
- _____. Modelagem numérica da região costeira de Santos (SP): Circulação de Maré. Revista Brasileira de oceanografia, vol. 46(2), p. 135-156. 1998.
- HARARI, J.; CAMARGO, R.; CACCIARI, P.L. Resultados da modelagem numérica hidrodinâmica em simulações tridimensionais das correntes de maré na Baixada Santista. Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH, vol.5, n.2, p. 71-87, Abr./Jun. 2000.
- HIDROCONSULT – Consultoria, estudos e projetos S.A.. Sistema de esgotos sanitários de Praia Grande – Investigações Oceanográficas – Resultado das campanhas de medição. São Paulo. 1976.
- _____. Reestudo preliminar do sistema de Disposição Final dos Esgotos da Praia Grande – Anexos. São Paulo. 1979.
- OZCAN, M.; GOKCE, K. T. Numerical model (MIKE 21) applications in outfall design: case studies from Turkey. In: 2nd International Conference on marine waste water discharges, Istanbul, Turquia, 2002. CD-ROM.
- SHOU, A.; VIEIRA, J. A practical procedure for sediment mapping for 2D modelling applications. In: 3rd DHI Software Conference & DHI Software Courses, Dinamarca, 1999. Disponível em: <http://www.dhi.dk/softcon/papers/htm>. Acesso em: 10 fev. 2003.
- UNISANTA. Modelação Hidrodinâmica do Estuário e da Baía de Santos. Coordenador do Projeto Prof. Eng. Gilberto Berzin. Santos. 1998/1999. 1 CD-ROM.
- WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY. Marine Disposal Systems. Great Britain. Vol. 25, n.9, 1992.