

IV-253 – MONITORAMENTO DO CAMPO DE DISPERSÃO DE EFLUENTES LANÇADOS NO MAR POR EMISSÁRIOS SUBMARINOS ATRAVÉS DO USO DE TRAÇADOR FLUORESCENTE

Felipe Ramos Barbosa⁽¹⁾

Mestrando do Programa de Engenharia Civil na Área de Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ.

José Otavio Goulart Pecly

D.Sc. em Engenharia Oceânica na Área de Engenharia Costeira pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ.

João Sérgio Fajardo Roldão

Pesquisador Associado do Programa de Engenharia Civil - COPPE/UFRJ.

Jacqueline Zardo Giori

M.Sc. em Engenharia Civil na Área de Meio Ambiente pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ.

Endereço⁽¹⁾: Centro de Tecnologia, Bloco B, Sala 101, Laboratório de Traçadores - Ilha do Fundão, CEP: 21941-914 - Rio de Janeiro, RJ – Brasil - Telefone: (21) 2270-4799 - e-mail: felipe.rbarbosa@yahoo.com.br.

RESUMO

Nas últimas décadas a qualidade das águas costeiras tem sofrido um intenso processo de degradação pelo lançamento de esgotos domésticos e industriais que escoam para as praias sem qualquer tratamento, seja em despejos diretos ou através de sistemas de drenagem pluvial. Em cidades costeiras, a utilização de emissários submarinos para disposição final de esgotos domésticos e industriais tem se mostrado uma prática crescente e, neste sentido, é importante a utilização de uma ferramenta que permita investigar a real capacidade de assimilação destes corpos d'água.

O presente trabalho teve como objetivo apresentar a metodologia e resultados obtidos em ensaios de campo para determinar experimentalmente os valores de diluição dos efluentes lançados em regiões costeiras por emissários submarinos sob condições meteo-oceanográficas distintas.

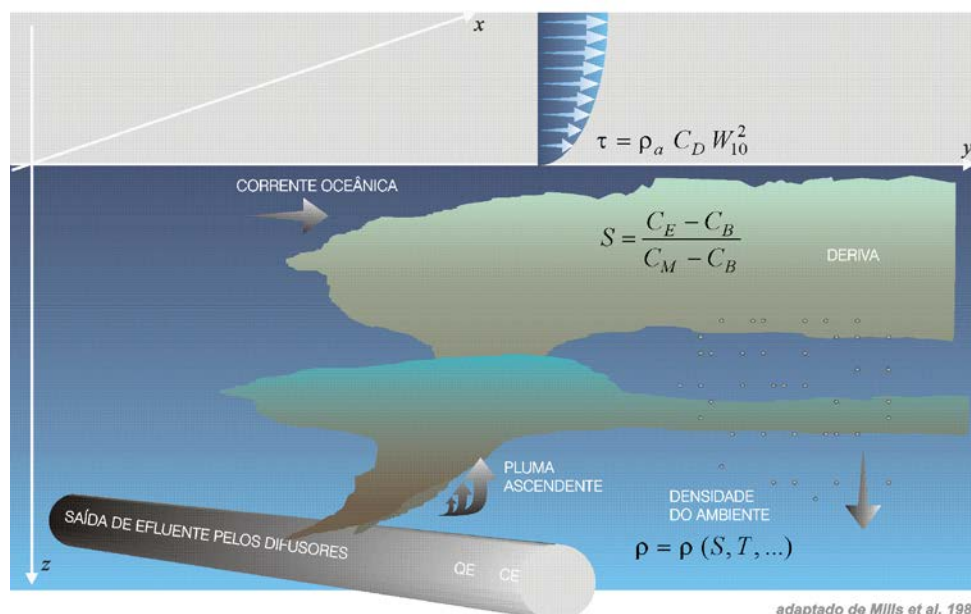
Os valores efetivos de diluição, em termos de Fator de Diluição (S), são determinados com o emprego da técnica de traçadores fluorescentes através de injeção contínua na entrada dos emissários terrestres que alimentam os emissários submarinos em estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Emissários Submarino, Traçadores Fluorescentes, Fator de Diluição.

INTRODUÇÃO

A utilização de emissários submarinos dotados de difusores multiorifícios, definidos a partir de projetos adequados é fundamental para garantir a qualidade da água após o processo de diluição inicial do efluente na zona de mistura. No processo de dispersão de um efluente na massa líquida, duas fases distintas devem ser consideradas. A primeira, referente à mistura inicial, ocorre na região denominada campo próximo ou “nearfield”, e depende, basicamente, das características geométricas do difusor (número de orifícios, diâmetro, alinhamento, etc.). A trajetória da pluma no campo afastado “farfield” é influenciada pelo fenômeno instável e caótico marés, das condições ambientais (nível de turbulência das águas, velocidade da corrente e estratificação térmica), que resultam em trajetórias imprevisíveis, aleatórias e independentes (ZIMMERMAN, 1986).

A Figura 1 apresenta um diagrama indicando o processo de diluição inicial (campo próximo) e deriva dos efluentes com as correntes oceânicas (campo afastado). O comportamento da pluma na zona de campo próximo pode definir o fator de diluição (S) do efluente lançado no meio, que é determinado pela vazão do emissário (QE) e a fatores como massa específica do efluente (ρ), pela estratificação da coluna de água e pelas correntes oceânicas. A ação dos ventos pode influenciar a circulação das camadas superficiais e, em alguns casos, determinar o padrão hidrodinâmico.



adaptado de Mills et al, 1987

Figura 1: Localização das áreas envolvidas nos ensaios com traçador fluorescente: rastreamento da pluma de traçador no mar.

Estudos de circulação têm sido realizados para prever (através de modelagem numérica) e medir (através de traçadores fluorescentes) o movimento de água em rios, lagos ou áreas costeiras e, visando avaliar o transporte e a diluição sofrida por lançamento de efluentes no corpo receptor. O transporte e a diluição de traçadores fluorescentes são avaliados através de análises de amostras de água coletadas no local de interesse ou pela leitura direta através de fluorímetros de campo. A informação medida é analisada para gerar Mapas de Contorno, com informações de concentração (diluição) ou estatísticas de ocorrência de uma dada concentração de traçador em determinados pontos.

Os valores efetivos de diluição, em termos de Fator de Diluição (S), normalmente são determinados através de injeção contínua de traçadores na entrada dos emissários terrestres que alimentam os emissários submarinos em estudo.

O Laboratório de Traçadores da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LT-COPPE/UFRJ) utiliza a técnica de traçadores fluorescentes para avaliação da diluição de descargas em emissários submarinos desde a década de 1989, e outros estudos realizados ao longo da costa do Brasil são mostrados na tabela 1.

Os trabalhos envolvendo a detecção dinâmica de traçadores em emissários submarinos vêm sendo aprimorados constantemente ao longo dos anos. O presente trabalho teve como objetivo apresentar a metodologia e resultados obtidos em ensaios de campo para determinar experimentalmente os valores de diluição dos efluentes lançados em regiões costeiras por emissários submarinos sob condições meteo-oceanográficas distintas.

Tabela 1: Informações a respeito dos ensaios de campo realizados pelo LT-COPPE/UFRJ em emissários submarinos utilizando traçadores fluorescentes .

Cidade (Localização)	Tipo de Efluente	Ano (Nº de Ensaios)	Nº de emissários	Prof. (m)	Comprimento do emissário (km)	Vazão total do emissário (m³/s)	Comp. de difusores (m)	Número de camadas avaliadas
Maceió	(I)	1988-89 (3)	1	17	1,8	1,1	250	1
Rio de Janeiro (Ipanema)	(I)	1996-97 (3)	1	28	4.3	6,0-6,2 4,8-5,7	450	3
Salvador	(D)	1995 (2)	1	27	2	0,95-1,1	75	2
(Rio Vermelho)	(D)	1999 (2)	1	27	2	4	75	3
Aratú	(I)	2002-03 (2)	1	15-25	0,15	2	10	1
Aracruz	(I)	1993 (4)	2	17	2	2,5	200	2
	(I)	2010 (2)	3	17	2	2,2	200	2
Guamaré	(I)	2008 (4)	2	6	5,7 7,2	1	100 250	1

Nota: (I) – Efluente Industrial;
 (D) – Efluente Doméstico.

MATERIAIS E MÉTODOS

A medição do fator de diluição efetivo (S) é um requisito básico para a avaliação do desempenho de um emissário na sua fase operacional. A metodologia utilizada com auxílio de traçadores fluorescentes é especialmente adequada para avaliar a capacidade de diluição de efluentes domésticos ou industriais em emissários submarinos. Parte-se da hipótese inicial de que a característica de diluição do traçador selecionado reproduz as características de diluição da parte solúvel do efluente, o que na prática não é uma hipótese muito restritiva.

DILUIÇÃO INICIAL

Diluição inicial é a diluição obtida em uma pluma devido ao efeito combinado da energia do jato submerso e da flutuabilidade do fluido descarregado através de um orifício e somado aos efeitos do misturamento turbulento nas vizinhanças da pluma. A taxa de misturamento é muito rápida na região de campo próximo e decresce significativamente após a quantidade de movimento e a flutuabilidade serem dissipadas, a medida que se aproxima da região de campo afastado. A dinâmica da pluma é controlada pela estratificação da densidade da coluna de água e pelas correntes oceânicas (BAUMGARTNER et al., 1994). A técnica de aplicação de traçador fluorescente para determinação da diluição do efluente no mar tem como premissa a relação de que o traçador simula o efluente lançado no mar. O Fator de Diluição “ S ”, de grande importância em estudos envolvendo o uso de traçadores na determinação da diluição de efluentes e em estudos envolvendo modelagem computacional, é definido por

$$S = \frac{C_e - C_B}{C_M - C_B} \quad \text{equação (1)}$$

onde:

S_a – Fator de diluição (adimensional);

C_M – concentração de traçador monitorada na pluma (mg/m³);

C_e – concentração média de traçador no efluente (mg/m³);

C_B – concentração de traçador na água ambiente (“background”) (mg/m³).

A equação 1 representa um fator de diluição volumétrico, envolvendo as substâncias solúveis e materiais em suspensão. A duração da injeção e do rastreamento de traçador no mar durante as campanhas de campo está em torno de 6 horas, que representa aproximadamente um semiciclo de maré em locais com padrão semi-diurno.

Um estudo de campo com traçador fluorescente engloba três tarefas principais: a injeção de traçador fluorescente, a determinação da concentração de traçador nos emissários terrestres e o rastreamento contínuo de traçador no mar.

VARIÁVEIS METEO-OCEANOGRÁFICAS

Um estudo típico deve considerar que o processo de mistura é dependente das condições ambientais e, assim, devem ser monitoradas simultaneamente as condições meteo-oceanográficas locais.

Os dados de parâmetros meteorológicos são medidos em estação meteorológica localizada próxima ao local do ensaio. Para o monitoramento de correntes e do estado de maré durante os ensaios utiliza-se um ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) adequado para as profundidades normalmente encontradas no estudo de emissários submarinos.

Durante os ensaios, um barco auxiliar realiza perfilagens verticais das diversas camadas de profundidade das linhas navegadas, em pontos específicos determinados pelo responsável pela navegação. Normalmente são realizadas medições de condutividade e temperatura em profundidades variando de metro a metro, com o auxílio de um CTD (*Conductivity Temperature Depth*), permitindo um melhor conhecimento das condições físico-químicas locais. A perfilagem vertical envolve ainda a coleta de uma série de amostras ao longo dos vários níveis de profundidade, as quais são armazenadas e utilizadas para medições de fluorescência com auxílio de espectrofluorímetro em laboratório.

SELEÇÃO DE TRAÇADOR

O traçador fluorescente usualmente adotado pelo LT-COPPE/UFRJ para trabalhos de campo em águas superficiais é o corante Sulforodamina G, também conhecido como Amidorodamina G (*Color Index 45220*). Este traçador possui excelente solubilidade em água e é conservativo quando aplicado em efluentes domésticos e industriais. É pouco sensível a variações de temperatura e pH, assim como ao fotodecaimento, baixa adsorção em sólidos em suspensão e baixa biodegradabilidade.

Em situações especiais onde, por qualquer motivo específico, é interessante o uso de um segundo traçador a Fluoresceína Sódica (*Color Index 45350*) geralmente é utilizada. Este traçador deve ser utilizado para ensaios de curta duração, devido a sua alta sensibilidade ao fotodecaimento e a biodegradação.

Os dois traçadores supracitados são seguros, tanto do ponto de vista toxicológicos e ecotoxicológicos (BEHRENS et al. 2001).

Análises laboratoriais com auxílio de técnicas espectrofluorimétricas permitem a detecção de ambos os traçadores em uma mesma amostra coletada. O limite de detecção da fluorescência através deste tipo de análise é da ordem de 0,01mg/m³. Já para o caso de medições *in situ*, onde são utilizados fluorímetros de campo, este limite varia de 0,1mg/m³ para água límpida e 0,3mg/m³ para águas mais turvas.

INJEÇÃO DE TRAÇADOR

A injeção de traçador fluorescente leva em consideração a vazão de efluentes lançados pelo emissário, onde é possível determinar a quantidade de traçador a ser utilizada e a duração de injeção. Em geral a vazão é constante, mas em situações onde a vazão dos efluentes pode variar, a vazão da injeção também deve ser ajustada, de modo a se manter uma concentração constante na parte terrestre do emissário.

A massa total do traçador a ser injetada depende da vazão de lançamento do efluente e da duração da injeção (normalmente entre 6-8 horas). A realização da injeção contínua é representada pela figura 2.



Figura 2: Injeção contínua de traçador fluorescente realizada na entrada de emissários submarinos.

A concentração de traçador na parte terrestre da tubulação do emissário (C_e), após a mistura completa do traçador no efluente, tipicamente tem valores em torno de 300-500 mg/m³, permitindo medir o valor máximo do fator de diluição (S) na faixa de 1000-3000 (dependendo das características ópticas da água do ambiente estudado).

MEDIÇÃO DE TRAÇADOR NA PORÇÃO TERRESTRE DO EMISSÁRIO

A fim de se obter um valor médio para a concentração de traçador (C_e), deve-se estabelecer uma rotina de amostragem em um ponto onde a mistura completa do traçador no efluente seja garantida. Geralmente este local é situado na transição da porção terrestre para a parte submersa do emissário.

Neste ponto, quando da aplicação de um traçador conservativo, pode ser determinada a vazão de efluente lançado através do método do Balanço de Massa, expresso pela equação 2

$$Q = \frac{C_i}{C_e - C_0} q_i \quad \text{Equação (2)}$$

onde:

- Q - Vazão na secção transversal do volume de controle;
- C_i - concentração inicial da mistura de traçador antes de ser injetado no sistema;
- C_e - concentração no ponto de medida (onde é coletada a amostra);
- C_0 - concentração no meio fluido sem o traçador
- q_i - vazão da bomba injetora.

DETECÇÃO DINÂMICA DE TRAÇADOR NO MAR

A detecção dinâmica do traçador é realizada através de bombeamento contínuo da água no mar com o barco percorrendo linhas paralelas em baixa velocidade. O rastreamento do traçador no mar, na zona de campo próximo e de campo afastado, é realizado a partir de uma embarcação equipada com fluorímetros portáteis, GPS, “datalogger”, dois “notebooks” (um equipado com um programa de visualização da navegação e outro

conectado ao “datalogger” para visualizar os dados do traçador registrados digitalmente) e outros equipamentos, todos funcionando em tempo real.

O mapeamento da pluma de traçador no mar é obtido através da aquisição das informações de posição do barco de rastreamento (em coordenadas UTM no datum adequado) e da fluorescência de traçador medida de água bombeada continuamente através de fluorímetros. Os valores de fluorescência medidos em campo são posteriormente transformados em valores de concentração de traçador tendo com base em uma reta de calibração construída com padrões conhecidos preparados com água do mar coletada em local afastado da região dos difusores.

As informações de posição geográfica versus concentração de traçador são registradas no “datalogger” instalado a bordo do barco mantido navegando sobre a pluma de diluição de traçador no mar até o final de cada ensaio. Na Figura 3 está representado um esquema dos dispositivos utilizados para o rastreamento contínuo do traçador.

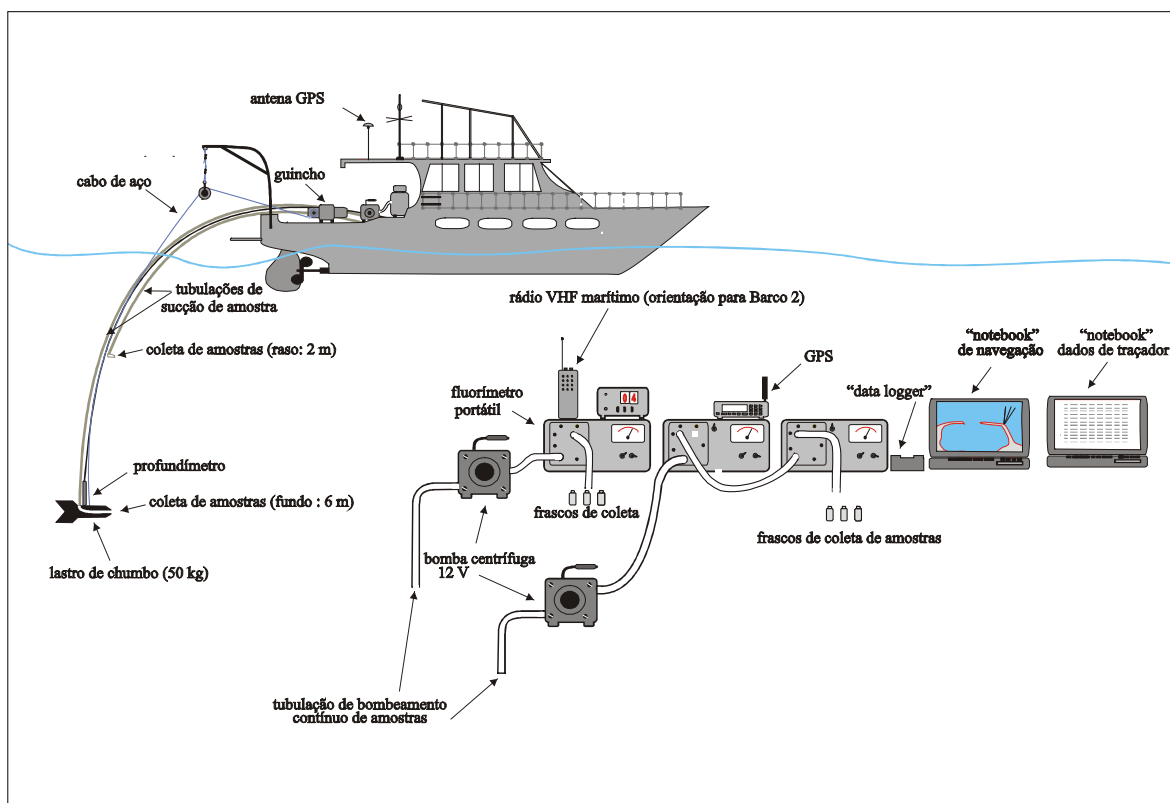


Figura 3: Esquema de montagem dos dispositivos e equipamentos de monitoramento de traçador no barco usado para rastrear no mar o traçador fluorescente injetado nos emissários submarinos.

As principais variáveis a serem estimadas/medidas são relacionadas à direção das correntes (por instrumentos ou visualmente), à direção do vento, às informações obtidas pelo perfil vertical da pluma de dispersão (em geral realizada por um segundo barco, denominado Barco # 2), ao tempo de trânsito estimado do traçador entre o local da injeção e os difusores, e um tempo de espera até que ocorra o espalhamento da pluma de traçador.

Um pequeno conjunto de amostras de água são coletadas ao longo das linhas de navegação, que são posteriormente analisadas em laboratório para comparar as concentrações do traçador, para verificar as curvas de calibração do fluorímetro a bordo.

As amostras coletadas, após identificadas e preservadas para evitar eventual biodegradação, são colocadas em engradados de proteção e encaminhadas para laboratório onde cada amostra é submetida a uma medição através de técnica espectrofluorimétrica. Um exemplo dos dados obtidos em linhas de navegação para profundidades de 2 e 6m está apresentado na figura 4.

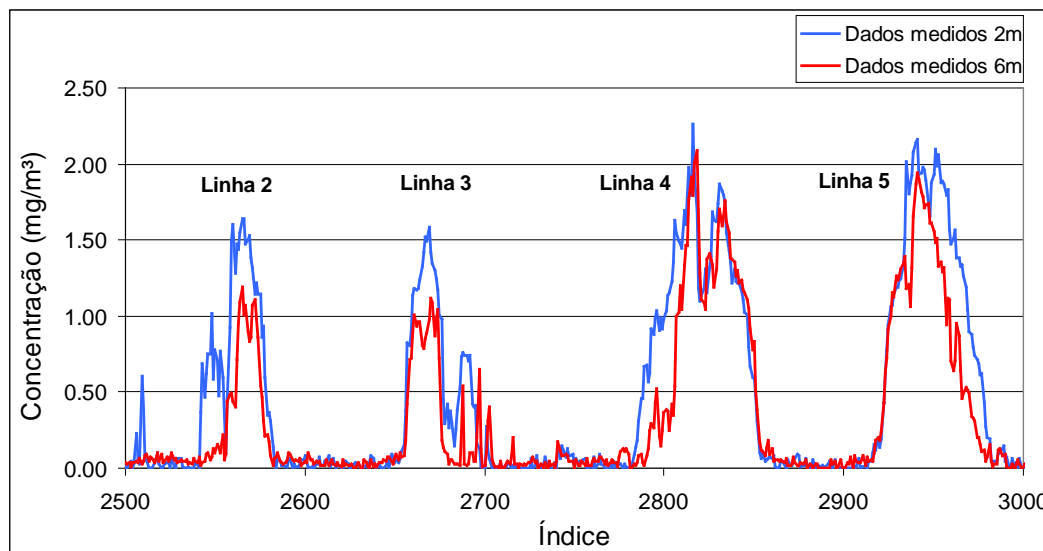


Figura 4: Variação da concentração de traçador ao longo das linhas de navegação.

RESULTADOS

A variação espacial da concentração medida ao longo das linhas de navegação é convertida em variação espacial do fator de diluição (S) através da equação 1. O produto final desse estudo é a apresentação de um Mapa de Contorno, contemplando o campo de dispersão e localização da pluma de efluentes do emissário submarino, para as condições meteo-oceanográficas observadas durante os ensaios de campo.

Em muitos casos, é feito um mapa de contorno usando o Método de Krige ou *kriging*, onde se aplica uma ponderação de média móvel com o objetivo de interpolar os pontos que não foram diretamente amostrados.

As figuras 5 e 6 são exemplos de mapas de contorno de plumas de traçadores em diferentes emissários submarinos. O mapa 6 ainda contempla as linhas de navegação realizadas.

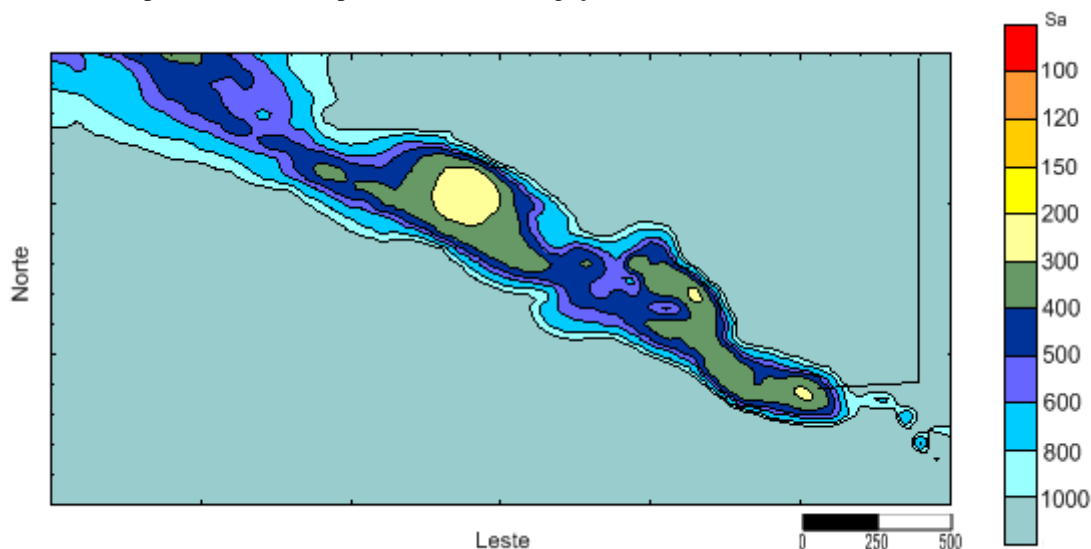


Figura 5: Mapa de contorno contendo as isolinhas de diluição da pluma de traçador fluorescente de um emissário submarino.

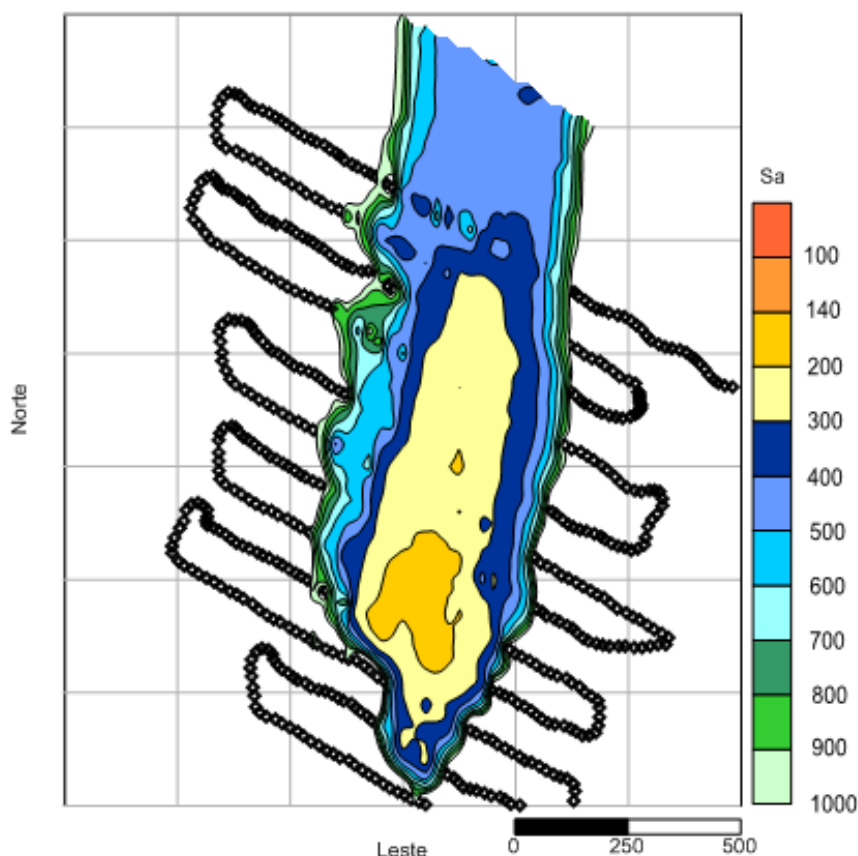


Figura 6: Mapa de contorno contendo as linhas de navegação e isolinhas de diluição da pluma de traçador fluorescente de um emissário submarino.

O Método de Krigé apresenta um pressuposto importante, que impõe que todos os dados tenham sido medidos em uma situação estável, o que não é rigorosamente verdadeiro em regiões costeiras. Dependendo da duração de uma campanha de campo e da dinâmica oceanográfica, a elaboração de um mapa de contorno pode conter certo grau de imprecisão.

Não obstante, os dados medidos ao longo de cada linha de navegação podem ser considerados obtidos em uma "situação estável", já que a duração de cada linha de navegação é de apenas alguns minutos. Apesar das suas limitações o desenho de mapas de contorno se configura como uma importante ferramenta que proporciona uma visão da direção de transporte e uma forma geral da pluma de diluição em um emissário submarino. Também é possível determinar, em uma visão mais ampla, a área correspondente a determinados fatores de diluição.

CONCLUSÕES

A técnica de traçadores fluorescentes, apesar de algumas limitações intrínsecas a sua aplicação, se apresenta como uma excelente ferramenta para a avaliação de lançamentos de efluentes, sejam esses domésticos ou industriais.

Os mapas de contorno contendo as isolinhas de diluição do efluente lançado por emissários submarinos promovem uma visão geral do comportamento da pluma para determinada condição de circulação.

A metodologia utilizada em um variado número de emissários na costa brasileira é considerada fundamental na avaliação de emissários submarinos. É possível delimitar áreas de influência e avaliar se a estrutura difusora opera de acordo com as premissas de projeto e obter informações valiosas para a modelagem computacional aplicada para a previsão das condições de operações de emissários em situações hidráulicas e oceanográficas adversas e/ou extremas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BAUMGARTNER, D. J., FRICK, W. E. AND ROBERTS, P. J. W. Dilution Models for Effluent Discharges, EPA Report EPA/600/R-94/086. U. S. Environmental Protection Agency, New Port, OR, 1994.
2. BEHRENS H., BEIMS U., DIETER H., DIETZE G., EIKMANN T., GRUMMT T., HANISCH H., HENSELING H., KÄß W., KERNDORFF H., LEIBUNDGUT C., MÜLLER-WEGENER U., RÖNNEFAHRT I., SCHARENBERG B., SCHLEYER R., SCHLOZ, W. AND TILKES F. Toxicological and Ecotoxicological Assessment of Water Tracers. *Hydrogeology Journal* 9, 321–325. doi: 10.1007/s100400100126, 2001.
3. FILHO, A. C. O, MONTENEGRO, E. S., ROLDÃO, J. S. F., WILSON JÚNIOR, G. Determinação da Capacidade de Diluição do Emissário da Aracruz Celulose com Traçadores Fluorescentes. 26º Congresso Anual de Celulose e Papel da ABTCP – SP, São Paulo, 1993.
4. HUNT, C. D., MANSFIELD, A. D., MICKELSON, M. J., ALBRO, C. S., GEYER, W. R., ROBERTS, P.J.W. Plume tracking and dilution of effluent from the Boston sewage outfall. *Journal of Marine Environmental Research*. ELSEVIER, pp. 150-161, 2010.
5. PECLY J. O. G. Monitoramento Ambiental do Emissário Submarino de Ipanema Usando Traçadores e Técnicas Geoestatísticas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000.
6. ROLDÃO, J., CARVALHO J. L. B., ROBERTS P. J. W. Field Observations of Dillution on Ipanema Beach Outfall. *Water Sci. Tchnol.* 43 (11) pp. 351-360, 2001
7. ROLDÃO, J.S.F., PECLY, J.O.G. e LEAL, L.C.P. Evaluation of Sewage Outfalls by Using Tracer Techniques Combined with Oceanographics Measurements. In: *Environmental Coastal Regions 98 – Cancun (Mexico)*, September, volume 1, p.209-218, 1998.
8. ZIMMERMAN, J.T.F. The Tidal Whirlpool: A review of Horizontal Dispersion by Tidal and Residual Currents. *Amsterdam: J. Sea Res.*, 20, 133-156, 1986.