



Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

**A UTILIZAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS
COMPUTACIONAIS COMO FERRAMENTAS DE ESTUDOS DE
IMPACTO AMBIENTAL RESULTANTE DO DESCARTE
DE SISTEMAS DE DISPOSIÇÃO SUBMARINA**

Maurício P. Lammardo¹, Marco Antonio Corrêa² & Eduardo Yassuda³

Applied Science Associates – ASA South America, R. Purpurina, 155 – Conj. 95
Vila Madalena, São Paulo, SP – CEP 05435-030

¹mauricio@appsci.com.br; ²mac@appsci.com.br & ³eyassuda@appsci.com.br

Resumo – Neste trabalho é apresentada uma metodologia para modelagem computacional das condições, padrões e exigências do descarte de efluentes através de sistemas de disposição submarina. O objetivo do trabalho é desenvolver ferramentas gerenciais para suporte na adequação destes sistemas às resoluções ambientais brasileiras (e.g. Resolução CONAMA 357/05), bem como para a realização de Estudos de Impacto Ambiental – EIA.

Palavras-Chave: modelagem numérica; CHEMMAP; descarte de efluentes

Abstract – This paper presents a methodology for computational modeling of effluent discharges through submerged outfalls. The purpose is to develop management tools to assist in the decision process for compliance with standards and regulations of the Brazilian environmental legislation (e.g. Resolution CONAMA 357/05), as well as environmental impacts studies.

Keywords: numerical modeling, CHEMMAP, effluent discharge

1. Introdução

No início do ano de 2005 foi publicada a Resolução do CONAMA¹ nº 357 (Brasil, 2005), que revoga a Resolução nº 20/86 (Brasil, 1986). Ambas resoluções tratam a respeito do mesmo assunto, *i.e.* estabelecem as condições e padrões de lançamento de efluentes nos corpos d'água. Dessa forma, o monitoramento das condições, padrões e exigências do descarte de efluentes se torna imprescindível para a adequação às exigências ambientais. O uso de ferramentas computacionais se torna útil para o monitoramento de fontes poluidoras, para que estas obedeçam às condições dispostas nesta Resolução, bem como para a realização de Estudos de Impacto Ambiental – EIA.

Com esse objetivo, o Modelo CHEMMAP da **Applied Science Associates (ASA)**, capaz de simular a distribuição de produtos químicos (massa e concentração) na superfície e coluna d'água, nos sedimentos, e na costa (ASA, 2002), se apresenta como uma ferramenta extremamente adequada a estas finalidades.

2. Descrição do CHEMMAP

O CHEMMAP, desenvolvido pela **Applied Science Associates, Inc. (ASA)**, possui estrutura tridimensional e simula separadamente a mancha superficial, as parcelas na coluna d'água, partículas da substância química pura, parcelas adsorvidas ao material particulado em suspensão e as parcelas dissolvidas dos produtos químicos (ASA, 2002).

Os processos biogeoquímicos simulados são: espalhamento, advecção, dispersão, evaporação, volatilização, entranhamento, dissolução, particionamento, sedimentação, adsorção e degradação.

O modelo utiliza as seguintes propriedades físico-químicas para simular a trajetória e o destino de produtos químicos descartados na superfície ou na coluna d'água: densidade, pressão de vapor, solubilidade na água, taxa de degradação, coeficiente de partição (adsorvido e dissolvido), viscosidade e tensão superficial. Cada um dos produtos que compõe o efluente deve ser simulado isoladamente.

O CHEMMAP possui a capacidade de realizar simulações determinísticas e probabilísticas. Utilizando-se o CHEMMAP no modo probabilístico é possível considerar a variabilidade das forçantes ambientais, de modo que as simulações de comportamento da pluma sejam realizadas através de variadas condições meteorológicas e oceanográficas dentro do período de disposição de dados ambientais. Tanto os ventos quanto as correntes, ou ambos, podem variar aleatoriamente.

2.1. Aspectos Teóricos

A massa do produto químico simulado é transportada pelo campo tridimensional de correntes fornecido por um modelo hidrodinâmico, considerando vento, correntes de circulação, movimento vertical – determinado pelo empuxo (*buoyancy*) – e dispersão. O modelo também é capaz de simular a adsorção de produtos a partículas de sedimentos em suspensão, resultando na sedimentação de materiais, calculada a partir da formulação de Stokes (*Stokes Law*). Partículas sedimentadas podem sofrer ressuspensão, uma vez que a velocidade no fundo ultrapasse o limite de erosão.

A pluma de efluentes é simulada segundo uma abordagem Lagrangiana, com uma série de partículas (*spillets*) representando a massa total do produto químico de interesse. A cada passo de tempo, as partículas se deslocam de acordo com o movimento do campo hidrodinâmico, sofrem reações biogeoquímicas, e se transferem para o próximo intervalo de tempo.

Para determinar a trajetória e o destino da pluma na superfície, no caso de plumas superficiais, o modelo estima o espalhamento superficial, o transporte da mancha (advectivo e difusivo), o entranhamento na coluna d'água e a evaporação.

O espalhamento é simulado utilizando-se o algoritmo de Fay (1971) e o entranhamento é modelado segundo Delvigne & Sweeney (1988). As plumas superficiais interagem com a linha de costa, depositando material de acordo com o tipo de costa e viscosidade do material. Os algoritmos utilizados são os mesmos desenvolvidos para derrames de óleo, como descrito em French *et al.* (1999)

2.2. Dados de Entrada

Existem três tipos de dados de entrada que são necessários para a utilização do modelo CHEMMAP: dados ambientais, propriedades físico-químicas dos compostos simulados e informações sobre o tipo de descarte.

Os dados ambientais consistem em informações de corrente, vento, dados batimétricos e tipo de costa. As informações de corrente podem ser oriundas de dados medidos na região de interesse, ou de um campo de correntes gerado através de modelagem hidrodinâmica. A vantagem deste último está na possibilidade de se utilizar campos tridimensionais de correntes com variação temporal. As informações de vento podem ser obtidas através de medição ou

¹ Conselho Nacional do Meio Ambiente

através de modelos de reanálise, *e.g.* NCEP e NCAR². Os dados batimétricos e as informações a respeito do tipo de costa podem ser provenientes de cartas náuticas e mapas de sensibilidade, respectivamente, e servem para a confecção de uma grade utilizada pelo modelo para determinar quais as áreas correspondentes à água (com suas respectivas profundidades) e terra, o tipo de linha de costa (*i.e.* praia de areia, costões rochosos, etc.) e o habitat correspondente (*e.g.* bancos de corais).

As propriedades físico-químicas de cada composto presente no descarte são incluídas, separadamente, no banco de dados do modelo, através de uma variedade de campos numéricos e de texto, especiais para a identificação e caracterização do químico descartado.

O último conjunto de dados de entrada do modelo é composto pelas informações sobre o tipo de descarte, como coordenadas do ponto de descarte, profundidade e vazão de descarte, duração de lançamento e da simulação, bem como propriedades físico-químicas do corpo d'água em estudo, *i.e.* densidade, temperatura, e salinidade.

3. Estudo de Caso

Neste trabalho, foi realizado um estudo hipotético do descarte de um efluente por um sistema de disposição submarina numa região oceânica ao sul da América do Sul. A escolha desta localidade específica deu-se unicamente como um exercício científico, não tendo a intenção de se tornar um estudo definitivo sobre a região. Assim, considerou-se um efluente descartado no meio com uma vazão de 200 m³/h. O químico simulado foi um composto conservativo com 10% de diluição e com densidade de 1.000 kg/m³.

A modelagem do transporte de uma pluma de efluentes compreende a modelagem do campo próximo e do campo afastado. O campo próximo corresponde à zona de diluição inicial, onde prevalecem os efeitos oriundos da velocidade inicial de ejeção e a diferença de densidade entre o efluente e o meio. Por campo afastado, entende-se a região onde passam a predominar os efeitos da dinâmica local no transporte e dispersão da pluma. Para representarmos o comportamento da pluma de efluentes deve-se separar o processo em modelagem do campo próximo e modelagem do campo afastado (realizada com o Modelo CHEMMAP).

3.1. Modelagem do Fator de Diluição do Campo Próximo

A modelagem do campo próximo pode ser realizada através do método descrito em trabalhos como Fischer *et al.* (1979), Roberts & Toms (1987, 1988) e Roberts *et al.* (1997), que se baseiam em formulações empíricas com o estabelecimento de relações entre aspectos dinâmicos do comportamento da pluma através de constantes estabelecidas em experimentos em laboratório. Outra forma de se realizar este tipo de modelagem é através de modelos computacionais como o *Visual Plumes* da agência ambiental americana (EPA) ou o CORMIX (*Cornell Mixing Zone Expert System*) da Cornell University, que foi o utilizado neste trabalho.

O CORMIX é um sistema de modelos computacionais desenvolvido para a análise, previsão e planejamento do lançamento de efluentes em diferentes corpos d'água (Jirka *et al.*, 1996). A ênfase do sistema se dá na previsão da geometria e das características de diluição da zona de mistura inicial, permitindo que valores aceitáveis de qualidade de água sejam calculados e discutidos.

O CORMIX é composto por três subsistemas: (a) CORMIX1, utilizado para a análise de lançamentos pontuais abaixo da superfície (*submerged single port discharges*); (b) CORMIX2, para a análise de múltiplos lançamentos pontuais (difusores) abaixo da superfície (*submerged multiport diffuser discharges*); e (c) CORMIX3, para a análise de lançamentos superficiais (*buoyant surface discharges*).

Embora a metodologia do CORMIX considere condições ambientais estacionárias, o sistema representa uma ferramenta adequada para a previsão tanto de feições qualitativas (*e.g.* classificação de fluxos), quanto de aspectos quantitativos (*e.g.* taxas de diluição, trajetórias de plumas) dos processos de mistura hidrodinâmicos resultantes de diferentes configurações de lançamentos e em vários tipos de corpos d'água, incluindo pequenos riachos, grandes rios, lagos, reservatórios, estuários e águas costeiras.

As características do sistema de disposição submarina utilizadas neste trabalho são apresentadas na Tabela 1. O sistema de disposição utilizado possui uma extensão de 1 km. Em sua extremidade final está localizado um difusor, com 8" de diâmetro. O efluente é descartado a 1,5 m acima do fundo, com uma vazão de 200 m³/h.

Tabela 1. Parâmetros utilizados para a modelagem do fator de diluição do campo próximo.

PARÂMETROS PARA MODELAGEM DA PLUMA	
Comprimento do sistema	1 km
Posição do ponto de descarte	52°01'24,2"S e 60°56'20,6"W
Profundidade local no ponto de descarte	23 m
Vazão do efluente	200 m ³ /h

² National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e National Center for Atmospheric Research (NCAR), disponibilizados pelo Climate Diagnostics Center (CDC) da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

3.2. Modelagem da Dispersão dos Efluentes no Campo Afastado

As simulações para a determinação da dispersão e diluição do efluente do sistema de disposição submarina estudado foram realizadas utilizando-se o modelo CHEMMAP no modo probabilístico. Neste modo é considerada a variabilidade das forçantes ambientais. Assim, as simulações de comportamento da pluma são realizadas através da variação das condições meteorológicas e oceanográficas, divididas em duas condições correspondendo ao verão (janeiro a março) e inverno (junho a agosto).

Para incorporar estas variabilidades, cada cenário probabilístico foi composto por uma série de 20 simulações com o modelo CHEMMAP, com duração de um dia. O comportamento da pluma de efluentes descartada na região foi estudado através de simulações realizadas com uma vazão constante ($200 \text{ m}^3/\text{h}$), durante 24 horas. O componente químico considerado nas simulações foi um composto conservativo com 10% de diluição.

3.3. Resultados e Discussão

O resultados apresentados tem por objetivo fornecer subsídios para a determinação da área de influência do descarte do efluente, visando à adequação às normas e requisitos ambientais.

Nas simulações probabilísticas, para a determinação da área de influência do efluente, as múltiplas trajetórias das plumas foram utilizadas para a produção de curvas de contorno para as máximas concentrações esperadas em cada ponto de grade. Ou seja, ao final de cada uma das simulações, registra-se o máximo valor de concentração na coluna d'água para cada ponto de grade, e ao final de todas as 20 simulações calcula-se a média de todas as máximas obtidas. Cabe ressaltar que a área ilustrada nas figuras representa a média das máximas concentrações obtidas em todas as 20 simulações, e não corresponde à posição da pluma em um determinado instante de tempo.

As figuras a seguir, mostram as curvas de contorno das plumas de dispersão para as médias das máximas concentrações do componente químico simulado. A Figura 1(a) apresenta as curvas de contorno da pluma para a condição de verão, enquanto a Figura 1(b) apresenta as curvas para a condição de inverno. Nestas simulações observa-se que no período de inverno, após um dia, o descarte apresenta uma maior área de dispersão.

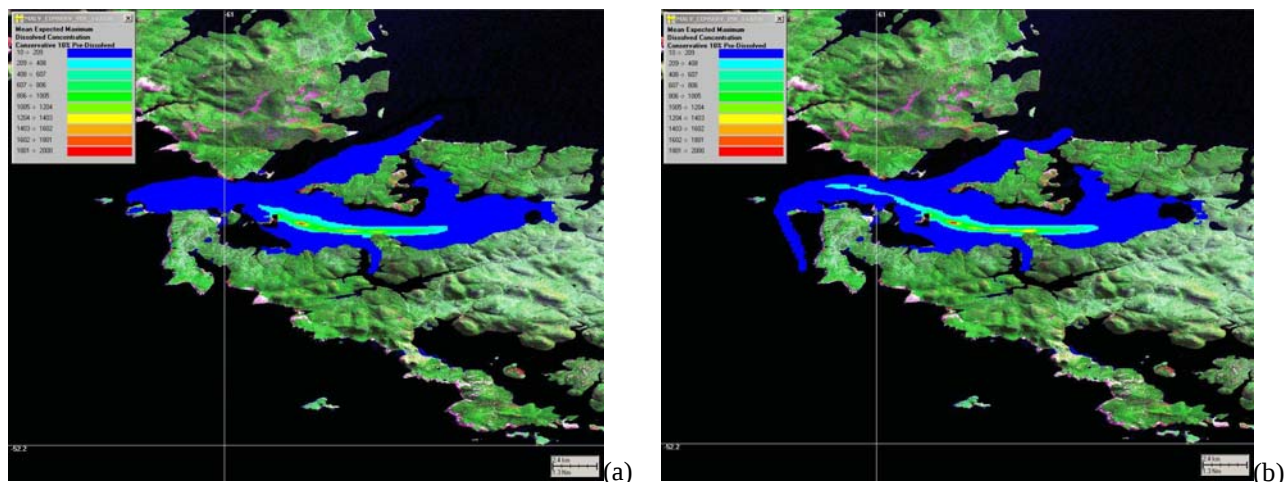


Figura 1. Concentrações máximas esperadas (mg/m^3) para a pluma do composto conservativo com 10% de diluição simulada em condições de verão (a) e de inverno (b).

As Figuras 2(a) e 2(b) a seguir, mostram os contornos de probabilidade das plumas de dispersão para os períodos de verão e inverno, respectivamente. Nestas, observa-se que em ambas as simulações, as maiores probabilidades de ocorrência do químico simulado encontram-se dentro da baía estudada, nas proximidades do ponto de descarte.

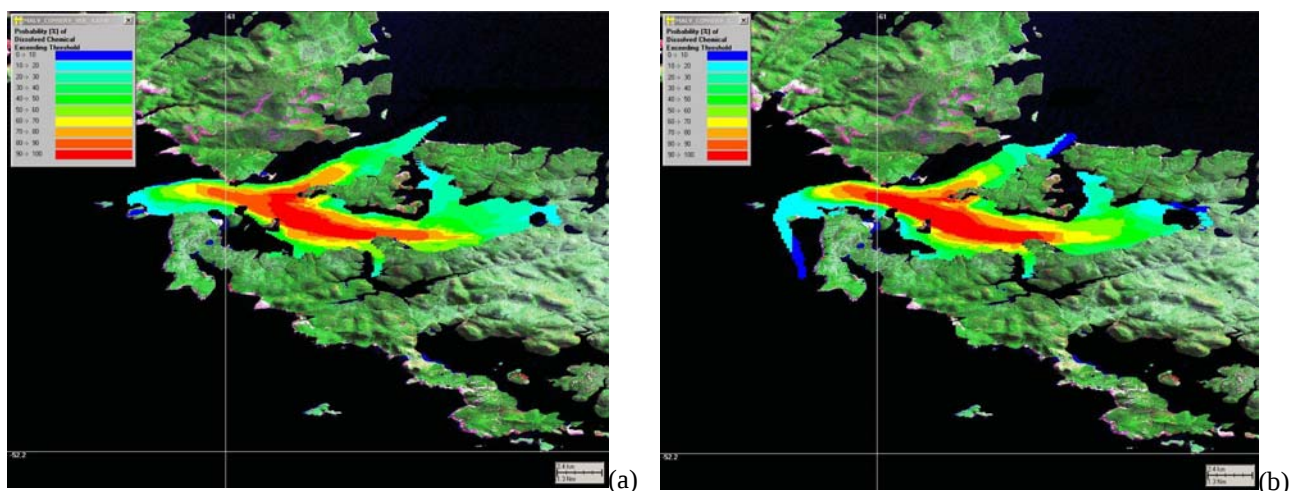


Figura 2. Contornos de probabilidade para a pluma simulada em condições de verão (a) e de inverno (b).

Os contornos relativos ao tempo de dispersão das plumas de dispersão, para os períodos de verão e inverno, são apresentados nas Figuras 3(a) e 3(b), respectivamente. Observa-se que em ambos os períodos as plumas atingem toda a extensão da baía em questão num período de até 12 horas.

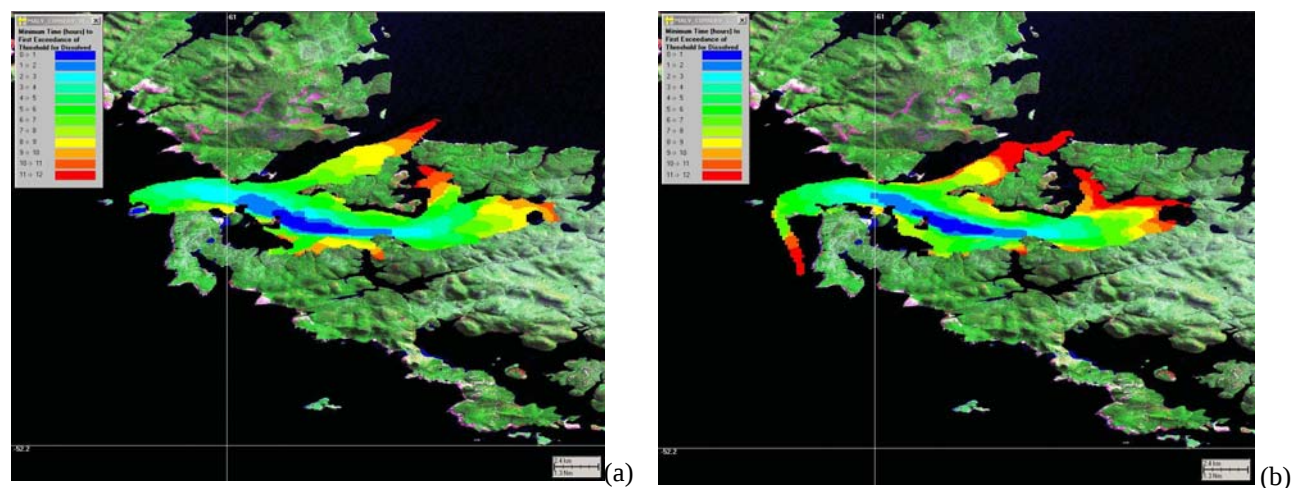


Figura 3. Contornos de tempo para a pluma simulada em condições de verão (a) e de inverno (b).

Os resultados obtidos com este tipo de modelagem contribuem para o monitoramento das condições, padrões e exigências do descarte de efluentes, para o enquadramento nas resoluções ambientais (e.g. Resolução CONAMA 357/05), bem como para a realização de Estudos de Impacto Ambiental – EIA. A modelagem numérica apresenta ainda outras vantagens, podendo ser aplicada ainda para a determinação do melhor lugar para o descarte de efluentes, auxiliando no projeto de construção de sistemas de disposição submarina.

4. Referências

- APPLIED SCIENCE ASSOCIATES, Inc. (ASA). CHEMMAP Technical Manual, Narragansett, RI, 81pp, 2002.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 20 de 18 de junho de 1986. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 30 jul. 1986.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 18 mar. 2005.
- DELVIGNE, G. A. L., SWEENEY, C. E. Natural dispersion of oil. *Oil & Chemical Pollution*, v. 4, p. 281-310, 1988.
- FAY, J. A. Physical Processes in the Spread of Oil on a Water Surface. In: *Proceedings at Joint Conference and Control of Oil Spills*, Washington, D.C., June 15-17, 1971.
- FISCHER, B. H., KOH, R. C. Y., IMBERGER, J., BROOKS, N. H. Mixing in Inland and Coastal Waters. *Academia Press, Inc.*, 483pp, 1979.
- FRENCH, D. H., SCHUTTENBER, G., ISAJI, T. Probabilities of oil exceeding thresholds of concern: examples from an evaluation for Florida Power and Light. In: *Proceedings AMOP 99 Technical Seminar*, Calgary, Alberta, Canada, p. 243-270, June 2-4, 1999.
- JIRKA, G. H., DONEKER, R. L., HINTON, S. W. User's manual for CORMIX. A hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters. U.S. Environmental Protection Agency. 152pp, 1996.
- ROBERTS, P. J. W., TOMS, G. Inclined dense jets in flowing currents. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 113, n. 3, p. 323-340, 1987.
- ROBERTS, P. J. W., TOMS, G. Ocean outfall system for dense and buoyant effluents. *Journal of Environmental Engineering*, v. 114, n. 5, p. 1.175-1.191, 1988.
- ROBERTS, P., J., W., FERRIER, A., DAVIERO, G. Mixing in inclined dense jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 123, n. 8, p. 693-699, 1997.