



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

MODELAGEM DO DESCARTE DE CASCALHO E FLUIDO DE PERFURAÇÃO COMO FERRAMENTA PARA O LICENCIAMENTO AMBIENTAL DE ATIVIDADES DE PERFURAÇÃO MARÍTIMA

Ana Carolina da Rocha¹, Maria Regina Fonseca Guimarães¹, Eduardo Yassuda¹

¹ ASA South America, Rua Purpurina, 155-conj95, São Paulo - SP,
anacarolina@appsci.com.br, regina@appsci.com.br e eyassuda@appsci.com.br

Resumo – A expansão das atividades de exploração e produção de petróleo faz com que seja necessário o conhecimento dos impactos associados a essas atividades. Nesse contexto, a modelagem numérica tem se mostrado uma ferramenta poderosa nos estudos ambientais com relação aos efeitos do descarte de cascalho e fluido de perfuração. No presente trabalho, o modelo MUDMAP da *Applied Science Associates (ASA)* foi utilizado em um estudo de caso para investigar o transporte, dispersão e deposição do cascalho e fluido de perfuração no assoalho oceânico, descartados durante as operações realizadas em um poço hipotético na Bacia de Campos, costa sudeste brasileira. Os resultados demonstraram coerência com a dinâmica local e permitiram identificar e avaliar os impactos ambientais decorrentes da atividade de perfuração marítima. Desta forma, pode-se cumprir as exigências do ELPN/IBAMA quanto à modelagem de cascalho e fluido de perfuração para a elaboração do Relatório de Controle Ambiental (RCA).

Palavras-Chave: modelagem numérica; licenciamento ambiental; MUDMAP

Abstract – The increasing E&P activities in Brazil is also requiring environmental assessment of its potential impacts. In this context, computational modeling has been a powerful tool in environmental studies related to the effects of drill cuttings and mud discharge. In this study, the modeling system MUDMAP was used to predict the transport, dispersion, and seabed deposition of drill cutting and mud discharged during drill operations in a hypothetical well in Campos Basin, southeast of the Brazilian coast. The results have shown coherence with the local dynamics, and they allowed identifying the environmental impacts resulting from drill activity in the sea. The framework developed from this study fulfills ELPN/IBAMA's requirements related to drill cuttings and mud modeling to support Environmental Impact Studies, such as the Environmental Control Report (RCA).

Keywords: numerical modeling, environmental permitting, MUDMAP

1. Introdução

Nos últimos tempos observamos uma grande evolução da indústria do petróleo no cenário brasileiro. Além disso, após a abertura do mercado nacional, teve início um processo de reestruturação na área industrial e de pesquisa, e as questões ambientais passaram a ocupar uma posição de destaque, principalmente nas atividades de exploração, exploração, transporte e refino do petróleo.

Um dos itens dos Termos de Referência elaborados pelo ELPN/IBAMA¹, utilizados na elaboração do Relatório de Controle Ambiental (RCA) para a Atividade de Perfuração Marítima, é a modelagem de cascalho e fluido de perfuração, para a identificação e avaliação dos impactos ambientais. Neste contexto, o MUDMAP, da **Applied Science Associates (ASA)**, é uma ferramenta extremamente adequada no estudo do transporte, dispersão e deposição de cascalho e fluido de perfuração, pois permite estimar a distribuição espacial (área de influência e espessura) das partículas acumuladas no assoalho oceânico.

2. Descrição do MUDMAP

O MUDMAP, desenvolvido pela **Applied Science Associates, Inc. (ASA)**, constitui-se em um modelo computacional para a previsão do transporte, dispersão e deposição de cascalhos e fluidos de perfuração e dispersão de águas de produção (ASA, 2000; Spaulding *et al.*, 1994; Spaulding, 1994).

O modelo MUDMAP é composto por uma série de componentes integrados. O modelo de descarte em si simula o movimento e a distribuição de materiais descartados no ambiente (na superfície e coluna d'água e no assoalho oceânico). Para efetuar esses cálculos, o modelo baseia-se em dados ambientais como correntes e propriedades de densidade da coluna d'água, dados geográficos como proximidade da linha de costa e parâmetros físicos que definem as propriedades do material descartado, além de informações sobre o processo de descarte.

As espessuras médias de material depositado são calculadas em função das partículas acumuladas no assoalho oceânico e da área onde estas estão distribuídas. No cálculo das espessuras, leva-se em consideração a massa total de sedimento presente em cada célula da grade, a área da célula, a porosidade e a densidade do material descartado.

O sistema é controlado através de uma interface gráfica (baseada em uma escala de cores), que consiste em: (1) um sistema integrado de modelos computacionais, de forma a permitir a interação entre os modelos de dispersão no campo próximo e no campo afastado, (2) um sistema de informação geográfica, (3) ferramentas de gerenciamento de informações ambientais para fornecer os dados de entrada dos modelos e (4) uma interface para visualização dos resultados.

2.1. Aspectos Teóricos

As equações que governam o modelo (conservação de massa, quantidade de movimento, empuxo e fluxo de partículas sólidas) são formuladas utilizando-se a teoria integral de pluma e, então, resolvidas com a técnica de integração numérica Runge Kutta.

O MUDMAP é baseado na formulação originalmente desenvolvida por Koh e Chang (1973) e estendida pelos trabalhos de Brandsma e Sauer (1983), conhecido como modelo OOC, para os estágios 1 e 2 do movimento da pluma. No campo afastado (difusão passiva) é empregado o método lagrangeano de trajetória de partículas utilizado no sistema de modelagem de derrames de óleo OILMAP (ASA, 1999). O modelo fornece a dinâmica da pluma, a distribuição das concentrações no campo próximo, a concentração e os padrões de deposição no fundo no campo afastado.

O sistema MUDMAP utiliza três estágios independentes, mas integrados, para a simulação do transporte e dispersão dos materiais descartados. A independência é necessária devido às diferentes escalas de tempo do processo de diluição da pluma entre os estágios. Dessa forma, os estágios são:

- Estágio 1 - convectivo dinâmico descendente/ascendente: simula a diluição e o espalhamento iniciais do material na vizinhança imediata do local de despejo. O material descende se for mais denso que a água no ponto de descarte e ascende se a densidade for menor que a da água;
- Estágio 2 - colapso dinâmico: estima o crescimento e diluição da pluma e como esta impacta a superfície ou o fundo, ou se mantém aprisionada por um forte gradiente de densidade na coluna d'água;
- Estágio 3 – dispersivo (campo afastado): onde o modelo simula o transporte e dispersão do material devido às correntes locais e campos de turbulência.

2.2. Dados de Entrada

O modelo MUDMAP necessita de uma série de informações para ser inicializado. Dentre elas, estão informações de corrente que 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 tri-dimensionais de correntes com variação temporal. Outra informação fundamental é o campo de densidade, que possui influência direta na velocidade de deposição das partículas descartadas.

¹ Escritório de Licenciamento das Atividades de Petróleo e Nuclear do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.

Outras informações relevantes utilizadas pelo MUDMAP são referentes às especificações do descarte como: fases de perfuração (com e sem *riser*), profundidade de descarte de cada fase, períodos da perfuração/simulação, duração efetiva do descarte por fase, diâmetro do poço por fase, e diâmetro e orientação da tubulação de descarte com *riser*. Com relação ao material descartado, é necessário conhecer as características físicas do cascalho e do fluido (e.g. granulometria, volume descartado por fase, densidade), o tipo de fluido utilizado em cada fase, sua composição e porcentagem em peso dos componentes do mesmo.

3. Estudo de Caso

Neste trabalho foi efetuado um estudo de caso na região da Bacia de Campos (assinalada em vermelho na Figura 1a), sudeste da costa brasileira, considerando o período de verão. Nesta região, os padrões de circulação e transporte são caracterizados por um fluxo para sul nos primeiros 500 m de profundidade, composto principalmente pela Corrente do Brasil e por variabilidades relacionadas aos padrões meteorológicos do Atlântico Sul. A partir dos 500 m de profundidade, o padrão dinâmico principal é definido por uma contra-corrente no sentido norte, sofrendo pouca influência do padrão barotrópico imposto pela maré. Na região sudeste, a circulação atmosférica de baixos níveis é dominada pela ação da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), pela passagem de sistemas frontais e por circulações locais. A variabilidade sazonal do padrão de ventos na região devido ao deslocamento da ASAS é caracterizada pelo predomínio de ventos de nordeste no verão e ventos de leste no inverno.

Os dados de entrada utilizados no estudo estão especificados no item 3.1, abaixo.

3.1. Dados de Entrada

- Campo de correntes:

A caracterização dos padrões de circulação e transporte na região foi obtida a partir de resultados de um modelo hidrodinâmico de meso-escala, calibrado na região da Bacia de Campos. O modelo utilizado foi baseado no *Princeton Ocean Model* (POM), adaptado e implementado pelo grupo de modelagem da **ASA SOUTH AMERICA**. Este modelo foi desenvolvido por Blumberg & Mellor (1987); e o código fonte é de domínio público, podendo ser obtido via internet no endereço: <http://www.aos.princeton.edu>.

Este modelo tem estrutura tridimensional, não linear, com as equações hidrodinâmicas sob as aproximações de Boussinesq e hidrostática. Utiliza-se de grades curvilíneas horizontais e coordenadas σ na vertical, com resolução das camadas turbulentas de superfície e de fundo, por meio de um submodelo de fechamento turbulento de 2ª ordem (Mellor & Yamada, 1982).

Para a representação discreta do domínio definido para o modelo hidrodinâmico, foi utilizada uma grade curvilínea, ortogonal e com resolução horizontal variável. Os dados de profundidade para a região da plataforma continental foram obtidos através da digitalização de cartas náuticas da DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha). Para a representação topográfica da região do talude e planície abissal foi também utilizada uma base batimétrica global (ETOPO 2, *National Geophysical Data Center* NGDC, NOAA). A Figura 1a mostra a projeção da batimetria na grade computacional utilizada na modelagem hidrodinâmica.

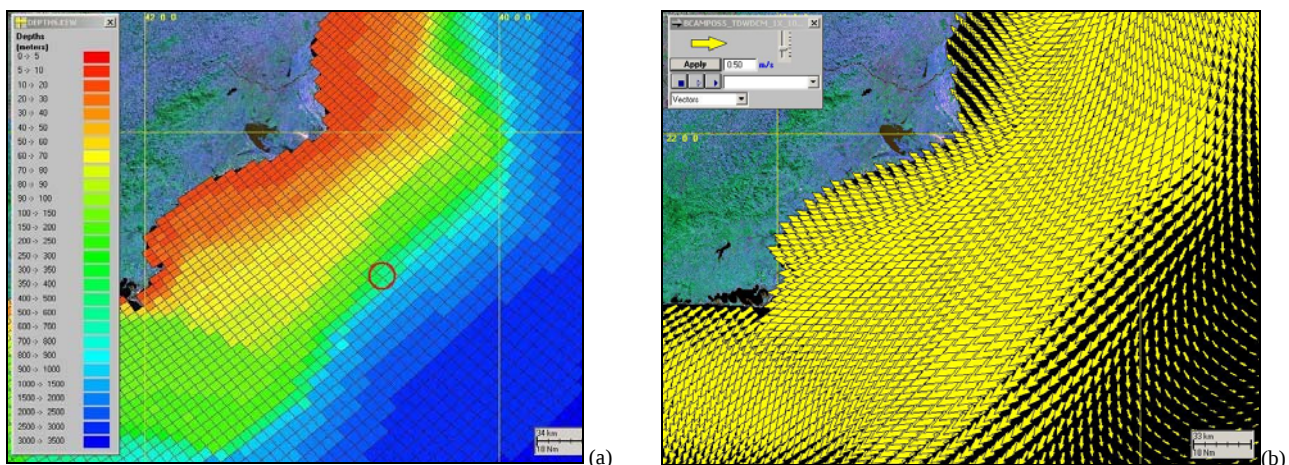


Figura 1. (a) grade computacional de meso-escala e batimetria projetada para a região da Bacia de Campos, e (b) instantâneo do campo de correntes, resultante da modelagem hidrodinâmica.

A modelagem hidrodinâmica foi realizada utilizando-se como forçante superficial o arrasto do vento, com dados provenientes de reanálises do NCEP e NCAR², projetados na grade. As componentes harmônicas de maré, também foram utilizadas como forçante para o modelo hidrodinâmico, obtidas a partir dos resultados do modelo global de maré do *Center for Space Research* da Universidade do Texas - CSR3. Os campos de temperatura e salinidade, originários do Atlas Eletrônico dos dados do WOCE (World Ocean Circulation Experiment – II), foram utilizados para inicialização do campo baroclínico. Estes dados foram tratados (analisados, filtrados e interpolados) e projetados na grade 3D do modelo. A Figura 1b apresenta um instantâneo de correntes de superfície geradas pelo modelo hidrodinâmico.

- Campo Termohalino:

O campo de densidade foi calculado com base em dados de temperatura e salinidade obtidos do Atlas Eletrônico dos dados do WOCE e tratados pela equipe da ASA. A Figura 2 apresenta uma secção vertical ao longo de 22,8°S do campo de densidade médio calculado para o período de verão.

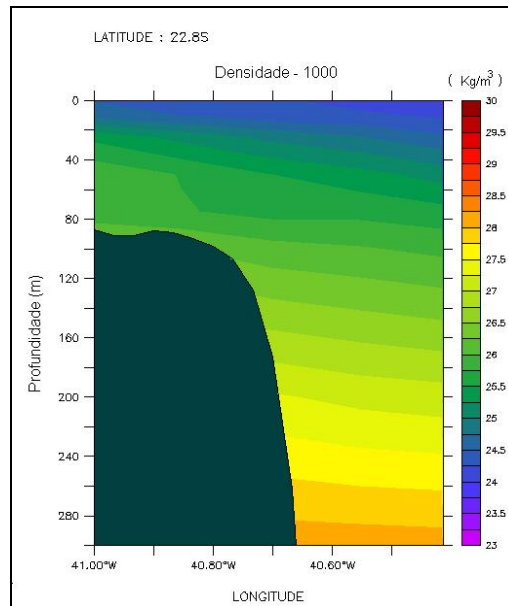


Figura 2. Secção vertical de densidade (kg/m^3) ao longo de 21,8°S para o verão. Dados provenientes do Atlas do WOCE

- Especificações do descarte e caracterização do material descartado:

O processo de perfuração foi dividido em 2 fases: Fase I, sem *riser* (fase sem retorno), e Fase II, com *riser* (fase com retorno). A Tabela 1 apresenta os volumes e a caracterização do cascalho e fluido de perfuração descartados. Salienta-se que a fase sem *riser* foi descartada 3 m acima do fundo do mar e que a fase com *riser*, 1 m abaixo da superfície do mar. Na Fase I foi simulado cascalho e fluido de perfuração convencional e na Fase II, cascalho e fluido salgado tratado com amido. Salienta-se que no presente estudo foi utilizado somente o estágio 3 (campo afastado) do modelo MUDMAP.

Tabela 1. Especificações do descarte de cascalho e fluido de perfuração.

Fases	Prof. descarte (m)	Duração do descarte (horas)	Materiais	Volume descartado (m³)	Densidade (kg/m³)	Tamanho das partículas (mm)	Massa percentual	Vel. Deposição (cm/s)
I	597	4	Cascalho	140	2.500	> 18,0	8	82,37
						12,5 – 18,0	42	75,82
						6,5 – 12,5	50	59,83
			Fluido	60	1.040	0,1 – 1,	20	18,65
						0,01 – 0,1	80	0,214
II	1	10	Cascalho	120	2.500	5,0 – 10,0	88	53,17
						1,0 – 5,0	12	33,63
						0,1 – 1,	20	18,65
			Fluido	80	1.140	0,01 – 0,1	80	0,214

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).

As velocidades de deposição das partículas foram calculadas segundo os pressupostos em Dyer (1986), Boeker e Grondelle (1999), Lima e Luz (2001), e Luz e Lima (2001). Nesses cálculos são considerados o tamanho das partículas, a densidade do material e a densidade do meio onde este será descartado.

3.2. Resultados e Discussão

A Tabela 2, a seguir, fornece as características da deposição de material calculadas pelo MUDMAP. A tabela lista a área coberta por depósitos de sedimento com espessuras maiores que 1 mm e a espessura máxima depositada.

Tabela 2. Máxima espessura depositada e área coberta por sedimentos com espessuras maiores que 1 mm.

Fases	Área (m ²) Coberta por Espessuras $\geq$ 1 mm	Espessura Máxima Depositada (mm)
I	330	160,0
II	70.000	2,4
TOTAL	70.330	160,0

A seguir, são apresentados graficamente os resultados obtidos nas simulações com o MUDMAP. Para facilitar a compreensão dos resultados, são apresentadas as distribuições espaciais do cascalho e fluido de perfuração ao final de cada fase e ao final das operações de descarte como um todo.

A Figura 3 apresenta os resultados das simulações para as Fases I (sem *riser*) e II (com *riser*) do descarte de partículas. Na Fase I, observa-se que a espessura máxima depositada foi de 160 cm, e está concentrada nas proximidades do ponto de descarte. Na Fase II, a espessura máxima depositada foi de 2,4 cm, concentrada 260 m a sudoeste do ponto de descarte. Essa orientação está de acordo com os padrões de circulação e transporte, associados aos movimentos das massas d'água observados na região. A realização em separado das simulações sem e com *riser* permitiu concluir que a maior influência sobre o assoalho oceânico, em termos de espessura, é consequência do descarte sem *riser* (descarte efetuado no fundo do mar), onde o acúmulo de material é maior. No descarte com *riser*, as espessuras depositadas são inferiores, pois o descarte é efetuado próximo à superfície do mar, o que faz com que as partículas permaneçam por maior tempo sob a ação das correntes na coluna d'água.

A Figura 4 apresenta a área de abrangência e espessuras previstas ao final de toda a operação de descarte de partículas. Salienta-se que os maiores valores de espessura (160 cm) são referentes basicamente à Fase I, e estão concentrados nas proximidades do ponto de descarte. A área total de abrangência do material descartado é de aproximadamente 70.330 m², sendo que grande parte da mesma (~70.000 m²) apresenta espessuras inferiores a 15 cm.

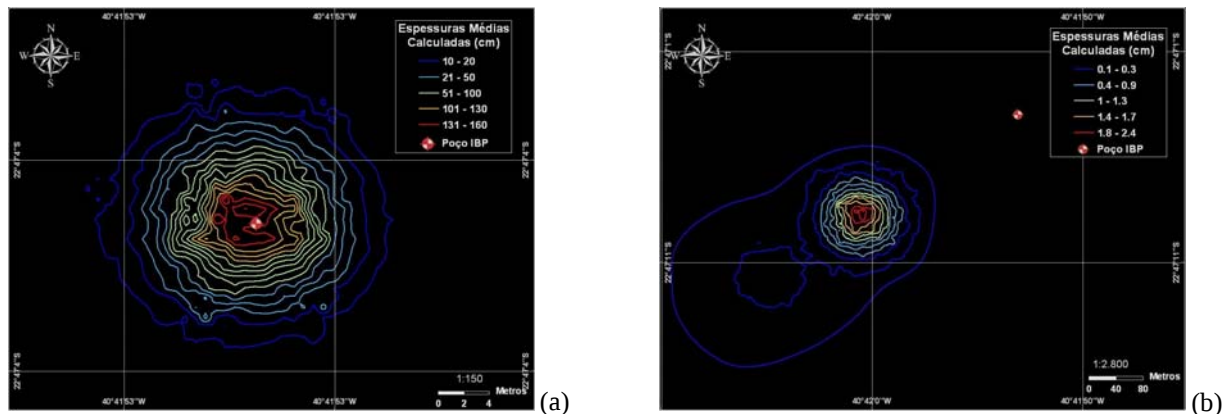


Figura 3. Área de abrangência e contornos de espessuras médias calculadas para o descarte de partículas: (a) Fase I – sem *riser* e (b) Fase II – com *riser*.

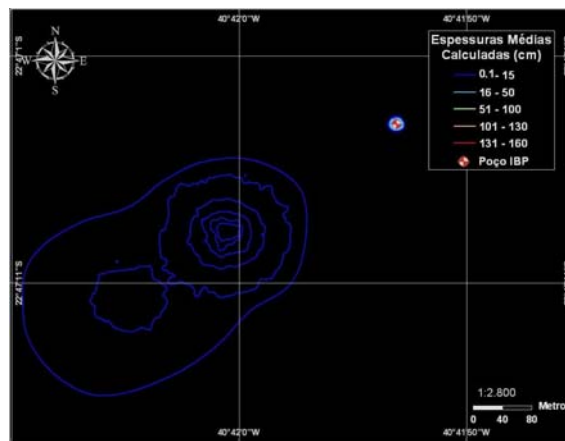


Figura 4. Área de abrangência e espessuras médias calculadas para o descarte de partículas ao final da operação.

As simulações com o MUDMAP permitiram estimar a distribuição espacial (área de influência e espessura) das partículas acumuladas no assoalho oceânico, contribuindo para o estudo do transporte, dispersão e deposição de cascalho e fluido de perfuração. Estes resultados contribuem para a identificação e avaliação dos impactos ambientais decorrentes de atividades de perfuração marítima, para o enquadramento dos RCA's nos Termos de Referência do ELPN/IBAMA.

5. Referências

- APPLIED SCIENCE ASSOCIATES, Inc. (ASA). OILMAP Technical and User's Manuals, Narragansett, RI, 55pp, 1999.
- APPLIED SCIENCE ASSOCIATES, Inc. (ASA). User's Manuals for MUDMAP, Version 3.5, Narragansett, RI, 51pp, 2000.
- BLUMBERG, A.F. & MELLOR, G.L. 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: N.S. Heaps (Ed.), Coastal and Estuarine Sciences 4: Three-dimensional Coastal Ocean Models. American Geophysical Union, p. 1-16.
- BRANDSMA, M.G. & SAUER, T.C. The OOC model: Prediction of short term fate of drilling mud in ocean. Part I: Model description, Part II: Model results. In: *Proceedings of Workshop on an Evaluation of Effluent Dispersion and Fate Models for OCS Plataforms*, Santa Barbara, California, February 7-10, 1983.
- BOEKER, E. & GRONDELLE, R.V. Environmental Physics. 2nd Ed. John Wiley & Sons Ltda, Nova Iorque. 442 pp, 1999.
- DYER, K.R. *Coastal and estuarine sediment dynamics*. John Wiley & Sons Ltd, 1986.
- KOH, R.C.Y. & CHANG, Y.C. Mathematical modeling for barged ocean disposal of waste. Environmental Protection Agency Technology Series EPA 660/2-73-029, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1973.
- LIMA, R.M.F. & LUZ, J.A.M.. Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: Lei de Stokes. *Rev. Esc. Minas*, vol. 54, no.2: p.155-159. ISSN 0370-4467, 2001.
- LUZ, J.A.M. & LIMA, R.M.F. Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: Regime turbulento e intermediário. *Rev. Esc. Minas*, vol. 54, no.3: p. 215-218. ISSN 0370-4467, 2001.
- MELLOR, G.L. & YAMADA, T. 1982. Development of a turbulence closure models for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, n. 4, 851-875.
- SPAULDING, M.L., ISAJI, T. & HOWLETT, E., 1994. MUDMAP: A model to predict the transport and dispersion of drill muds and production water. Applied Science Associates, Inc, Narragansett, RI.
- SPAULDING, M.L., 1994. MUDMAP: A numerical model to predict drill fluid and production water dispersion, Offshore, Houston, Texas, March 1993. Applied Science Associates, Inc, Narragansett, RI.