

Modelagem do Descarte de Cascalhos e Fluidos de Perfuração para o Bloco BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas

Revisão 00

Março/2016





TETRA TECH
Rua Fidalga, 711
Vila Madalena – São Paulo –SP
CEP 05432-070
<http://www.tetrattech.com>



BP Energy do Brasil Ltda.
Av. das Américas, 3434 / Bl. 7 – Sl. 301 a 308
Barra da Tijuca
Rio de Janeiro – RJ
CEP 22640-102
www.bp.com

Modelagem do Descarte de Cascalhos e Fluidos
de Perfuração para o Bloco BAR-M-346,
Bacia de Barreirinhas

Equipe Técnica TETRA TECH:

ANA CAROLINA R. LAMMARDO
EDUARDO A. YASSUDA
GABRIEL CLAUZET
GLAUCO M. LOPES
MARIANA L. GOUVÊA
PEDRO FABIANO M. SARMENTO
TITO CONTE

(Oceanógrafa)
(Engenheiro Mecânico)
(Físico)
(Oceanógrafo)
(Meteorologista)
(Oceanógrafo)
(Oceanógrafo)

Revisão 00
Março / 2016

TETRA TECH é responsável pelo conteúdo do presente relatório incluindo: tecnologias, metodologias, especificações técnicas, desenhos, figuras, cópias, diagramas, fórmulas, modelos, amostras e fluxogramas.

A utilização deste material deverá ser compatível com o escopo do projeto/trabalho contratado, fazendo-se expressa menção ao nome da TETRA TECH como autora do estudo. Da mesma forma, quando a equipe técnica da TETRA TECH for incorporada na equipe técnica da empresa contratante, esta deverá ser mencionada, e referenciada, como: “consultores da TETRA TECH”. Qualquer dúvida ou alteração desta conduta deverá ser discutida entre o cliente e a TETRA TECH.

TETRA TECH, 2016. Modelagem do Descarte de Cascalhos e Fluidos de Perfuração para o bloco BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas. Relatório Técnico, Revisão 00 (22 de março de 2016). 44pp+Anexos.



ÍNDICE GERAL

CONTROLE DE REVISÕES	1
ÍNDICE GERAL	3
LISTA DE FIGURAS.....	5
LISTA DE TABELAS	7
RESUMO.....	9
1. INTRODUÇÃO	11
1.1. ÁREA DE ESTUDO	12
2. MODELAGEM DO DESCARTE DE CASCALHOS E FLUIDOS DE PERFURAÇÃO	14
2.1. DADOS DE ENTRADA	14
2.1.1. Perfil Termohalino	16
2.1.2. Campo de Correntes.....	18
2.1.3. Campos de Vento	16
2.1.4. Domínio Modelado e Batimetria	18
2.1.5. Especificações dos Processos de Perfuração/Descarte e Caracterização do Material Descartado	20
2.1.6. Duração das Simulações	24
2.1.7. Critérios de Corte Adotados na Apresentação dos Resultados	24
2.1.8. Resumo dos Cenários Simulados	26
3. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	27
3.1. DEPÓSITOS NO ASSOALHO OCEÂNICO	27
3.1.1. Área de Abrangência Total.....	32
3.2. CONCENTRAÇÃO NA COLUNA D'ÁGUA.....	34
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
5. BIBLIOGRAFIA	42
6. EQUIPE TÉCNICA.....	43
ANEXO A – DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS DREAM.....	A-1
ANEXO B – DESCRIÇÃO DOS DADOS DO WOA13.....	B-1
ANEXO C – ANÁLISE DAS CORRENTES PARA DETERMINAÇÃO DOS PERÍODOS DE SIMULAÇÃO	C-1



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo.....	12
Figura 2 - Grade habitat: 1.000 x 1.000 pontos, resolução de 20 m no eixo X e 20 m no eixo Y... 19	
Figura 3 - Área de abrangência e espessuras médias calculadas para o descarte de partículas ao final das operações de descarte do Poço BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas, para o cenário ESE – menos intenso.	29
Figura 4 - Área de abrangência e espessuras médias calculadas para o descarte de partículas ao final das operações de descarte do Poço BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas, para o cenário ESE – mais intenso.	30
Figura 5 - Área de abrangência e espessuras médias calculadas para o descarte de partículas ao final das operações de descarte do Poço BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas, para o cenário WNW – menos intenso.	31
Figura 6 - Área de abrangência e espessuras médias calculadas para o descarte de partículas ao final das operações de descarte do Poço BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas, para o cenário WNW – mais intenso.	32
Figura 7 - Área de abrangência total considerando espessuras iguais ou superiores a 0,01; 0,1; 1,0 e 1,0 mm, ao final das operações de descarte no Bloco BAR-M-356, Bacia de Barreirinhas.....	33
Figura 8 - Concentração máxima de sólidos na coluna d'água para todo o período de simulação e para todas as Fases de descarte do Bloco BAR-M-346: visão em planta e perfil. Cenário corrente ESE – menos intenso.....	35
Figura 9 - Concentração máxima de sólidos na coluna d'água para todo o período de simulação e para todas as Fases de descarte do Bloco BAR-M-346: visão em planta e perfil. Cenário corrente ESE – mais intenso.....	36
Figura 10 - Concentração máxima de sólidos na coluna d'água para todo o período de simulação e para todas as Fases de descarte do Bloco BAR-M-346: visão em planta e perfil. Cenário corrente WNW – menos intenso.....	37
Figura 11 - Concentração máxima de sólidos na coluna d'água para todo o período de simulação e para todas as Fases de descarte do Bloco Poço BAR-M-346: visão em planta e perfil. Cenário corrente WNW – mais intenso.....	38



LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coordenadas geográficas (SIRGAS2000) e lâmina d'água para o ponto de modelagem.	13
Tabela 2 - Parâmetros numéricos utilizados como input na modelagem de cascalhos e fluidos de perfuração.	15
Tabela 3 - Perfis de temperatura e salinidade para a região do Bloco BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas.	17
Tabela 4 - Classes granulométricas para cascalhos perfurados com fluido de base aquosa (adaptado de DAMES & MOORE, 1978 apud BRANDSMA & SMITH, 1999).	21
Tabela 5 - Classes granulométricas para cascalhos perfurados com fluido de base sintética (adaptado de O'REILLY, et.al., 1988 apud BRANDSMA & SMITH, 1999 ⁸).	21
Tabela 6 - Classes granulométricas para a bentonita e baritina.	22
Tabela 7 - Especificações do descarte de cascalhos e fluidos de perfuração para o Bloco BAR-M-346.	23
Tabela 8 - Cenários simulados para o descarte de cascalhos e fluidos de perfuração para o Bloco BAR-M-346.	26
Tabela 8 - Resumo dos resultados de deposição no assoalho oceânico para o Bloco BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas considerando todas as fases de perfuração.	27
Tabela 9 - Relação para cada cenário, considerando a máxima deposição de espessura e resolução da célula de grade.	28
Tabela 10 - Resumo das áreas de abrangência com espessuras iguais ou superiores a 0,01 mm e 1,0 mm para o Poço BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas – resultado integrado.	32
Tabela 11 - Resumo dos resultados de concentração máxima na coluna d'água (integração dos resultados ao longo de todo o período simulado) para o Bloco BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas – por cenário simulado.	34
Tabela 12 - Resumo dos raios medidos dos poços de perfuração até a maior distância alcançada para espessuras superiores a 0,01 mm e 1,00 mm.	41



RESUMO

Este relatório apresenta os resultados da modelagem de descarte de cascalhos e fluidos de perfuração para o Bloco BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas, decorrente das atividades de perfuração exploratória da BP Energy do Brasil (BP).

A caracterização dos padrões de circulação na região foi obtida através de um modelo hidrodinâmico implementado pela TETRA TECH, baseado no Delft3D-FLOW. Para a modelagem de descarte de cascalhos foi utilizado o modelo DREAM (*Dose-Related Exposure Assessment Model*).

As simulações consideraram o descarte de cascalhos com 9 classes de tamanho de grão para fluidos base aquosa e 11 classes para fluidos base sintética, proveniente de bibliografia especializada. Para as simulações dos fluidos de perfuração foram consideradas as granulometrias de seus principais constituintes sólidos (bentonita e baritina).

Foram realizadas simulações considerando todas as fases de perfuração na locação do poço considerado quatro condições hidrodinâmicas (correntes mais e menos intensas nas duas direções predominantes para toda a coluna d'água).

De maneira geral, as espessuras observadas variaram entre 209,7 a 282,4 cm. As direções de deposição seguiram as direções preferenciais das correntes ao longo da coluna d'água, variando entre oeste e leste, com áreas de 0,68 km² a 1,08 km² para espessuras iguais ou superiores a 0,01 mm. Considerando as espessuras de 1,0 mm, as áreas variaram de 0,21 km² a 0,26 km².

Vale ressaltar que os depósitos de maiores espessuras (acima de 100 cm), localizados nas proximidades do poço, ocupam uma área significativamente inferior, entre 0,0004 e 0,0008 km².

Pág.	Modelagem do Descarte de Cascalho e Fluidos de Perfuração para o Bloco BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas	
10/44		

Adicionalmente, neste relatório, são apresentados os resultados de concentração na coluna d'água referente aos fluidos de perfuração ao longo de todo o período simulado de todas as Fases. Os resultados mostram concentrações máximas no cenário de direção predominante de ESE – menos intenso, com valores de 168,9 mg/L. Estas concentrações estão localizadas próximas do ponto de descarte e sua persistência na coluna d'água está limitada ao período do próprio descarte.

Revisão 00 03/2016	Tt 16-007	<hr/> Técnico Responsável	
-----------------------	-----------	---------------------------	---



1. INTRODUÇÃO

Com o objetivo de dar suporte a BP no desenvolvimento de estudos ambientais na Bacia de Barreirinhas (MA), apresenta-se este trabalho de modelagem computacional da distribuição espacial (área de abrangência, espessuras e concentrações na coluna d'água) de cascalhos e sólidos dos fluidos de perfuração.

Toda a avaliação foi conduzida através da utilização de um sistema de modelos computacionais conhecido como DREAM¹, desenvolvido pela SINTEF². O campo de correntes característico dos padrões de circulação na região foi obtido a partir da modelagem hidrodinâmica tridimensional implementada pela TETRA TECH com o Delft3D-FLOW na Bacia de Barreirinhas e adjacências

Foram conduzidas simulações do descarte de material, utilizando nove intervalos de classe de tamanhos para os cascalhos perfurados com fluido base aquosa e onze intervalos de classe de tamanhos para os cascalhos perfurados com fluido base sintética, proveniente de bibliografia especializada. Para ambos os fluidos de perfuração (base aquosa e sintética) foi utilizada a granulometria dos seus principais constituintes sólidos (bentonita e baritina).

As simulações consideraram todas as fases de perfuração e quatro condições hidrodinâmicas (correntes mais e menos intensas para as duas direções predominantes na coluna d'água).

O Capítulo 1, além de discutir o propósito do estudo, fornece informações sobre a área em questão. O Capítulo 2 descreve o modelo hidrodinâmico enquanto o Capítulo 3 mostra os cenários simulados, suas características e os dados de entrada. Os resultados das simulações são apresentados no Capítulo 4. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais do presente estudo. A descrição do modelo DREAM encontra-se no Anexo A; e o Anexo B apresenta os detalhes sobre a fonte de obtenção de dados de temperatura e salinidade. No Anexo C segue a análise das correntes para a determinação dos períodos de simulação, enquanto o Anexo D mostra a composição dos fluidos de perfuração.

¹ Dose-Related Exposure Assessment Model.

² Stiftelsen for Industriell og Teknisk Forskning: Fundação para a Pesquisa Científica e Industrial

1.1. ÁREA DE ESTUDO

A Figura 1 apresenta a localização do ponto selecionado para o estudo do descarte de cascalhos e fluidos de perfuração, localizado no vértice do Bloco BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas. Este ponto foi escolhido por representar o cenário mais crítico dentre os possíveis na área do Bloco BAR-M-346, em virtude de estar (i) na zona de menor distância a um ponto da costa, (ii) na faixa de menor profundidade das existentes no bloco; e (iii) na região das correntes mais intensas da CNB, associadas ao seu deslocamento sobre o talude.

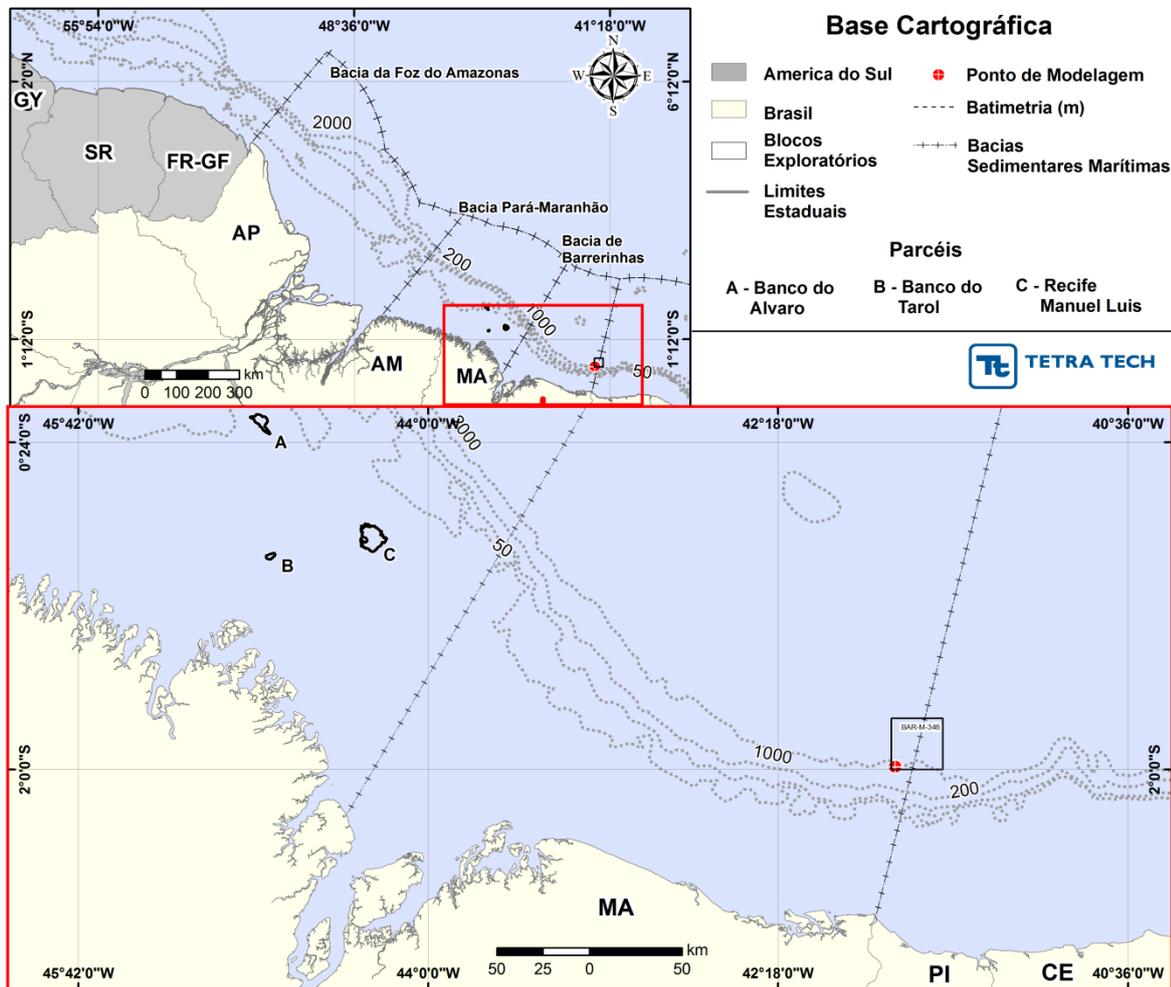


Figura 1 - Localização da área de estudo.



A Tabela 1 apresenta as coordenadas geográficas e a lâmina d'água do ponto de modelagem.

Tabela 1 - Coordenadas geográficas (SIRGAS2000) e lâmina d'água para o ponto de modelagem.

BLOCO	POÇO	LATITUDE	LONGITUDE	PROF. (m)
BAR-M-346	Barreirinhas#1	01° 59,2041' S	041° 43,8411' W	1.900,0

2. MODELAGEM DO DESCARTE DE CASCALHOS E FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

A modelagem do descarte de cascalhos e fluidos de perfuração foi realizada utilizando-se o modelo DREAM, desenvolvido pela SINTEF para estimar o comportamento e o destino de diversos tipos de efluente (incluindo cascalhos e fluidos de perfuração) no ambiente marinho, tanto na coluna d'água quanto no leito oceânico. Ressalta-se que o módulo de sedimentos deste modelo é determinístico e não possui modo probabilístico. A descrição mais detalhada deste modelo encontra-se no Anexo A.

2.1. DADOS DE ENTRADA

Os conjuntos de dados de entrada e parâmetros do modelo que definem um cenário são:

- ✓ Localização geográfica do(s) ponto(s) de descarte;
- ✓ Linha de costa;
- ✓ Batimetria;
- ✓ Grade *habitat* / tipo de ambiente;
- ✓ Data/período de perfuração (por fase);
- ✓ Tamanho e orientação da tubulação de descarte (por fase);
- ✓ Profundidade e angulação do descarte (por fase)
- ✓ Duração do descarte (por fase);
- ✓ Volume (ou vazão) descartado (por fase);
- ✓ Duração da simulação;
- ✓ Campo de correntes;
- ✓ Temperatura e salinidade (na coluna d'água);
- ✓ Tipo material (cascalho e/ou fluido de perfuração);
- ✓ Características/composição do material descartado;
- ✓ Parâmetros de simulação.



Os resultados de cada simulação correspondem, então, a um único cenário, definido pelo arquivo de entrada de dados e parâmetros do modelo. A Tabela 2 apresenta os valores dos parâmetros utilizados como dados de entrada na modelagem de cascalhos e fluidos de perfuração.

Tabela 2 - Parâmetros numéricos utilizados como input na modelagem de cascalhos e fluidos de perfuração.

PARÂMETROS	VALOR UTILIZADO NO MODELO (DREAM)	
Passo de tempo	10 minutos	
Intervalo de saída (<i>Output</i>)	10 minutos	
Número de partículas (Superfície)	3.000	
Número de partículas (Subsuperfície)	3.000	
Número de Camadas Verticais	100	
Resolução espacial da grade	20 m (X)	20 m (Y)
Temperatura da água do mar (°C)	Ver item II.1.3	
Salinidade da água do mar	Ver item II.1.3	
Localização do Ponto de Descarte	01° 59,2041' S e 041° 43,8411' W (Tabela 1)	

Os subitens seguintes apresentam detalhes sobre os dados de entrada como campos de corrente e vento, campo termohalino, batimetria, domínio modelado, localização do ponto de descarte, volumes de sólidos, períodos de simulação, e características dos materiais.

Apesar de o modelo utilizar um campo de ventos como dado de entrada, a dispersão do material descartado é influenciado basicamente pela ação das correntes e campo termohalino.

A escolha dos dados utilizados como forçantes no modelo de dispersão e do método adotado neste estudo procuram atender aos requisitos da Coordenação Geral de Petróleo e Gás (CGPEG/IBAMA) para a modelagem de cascalho.

2.1.1. Campos de Vento

Para caracterização do regime de ventos na região de estudo foi utilizado um conjunto de dados de vento variável no tempo e no espaço, proveniente de reanálise do CFSR³, para o mesmo ano da modelagem hidrodinâmica, com resolução espacial de 0,3° e resolução temporal horária. Trata-se de um conjunto de assimilação de dados que acopla os sistemas oceano-superfície-atmosfera e continente-gelo, em escala global e em alta resolução.

O CFSR difere de outros produtos de reanálise pelo acoplamento entre o oceano e a atmosfera, por ter um modelo interativo de gelo marinho e também por assimilar dados de satélites através de um esquema de interpolação estatística. Além disso, contém informações sobre variações nos níveis de dióxido de carbono, aerossóis atmosféricos e gases-traço, incluindo assim seus efeitos sobre o sistema climático terrestre.

2.1.2. Perfil Termohalino

As informações de temperatura e salinidade da água do mar utilizadas como dado de entrada no modelo DREAM são apresentadas na Tabela 3 abaixo, e foram obtidos no Atlas Eletrônico de dados do WOA13⁴. Este Atlas é composto por diversos conjuntos de dados conceituados que são disponibilizados pela comunidade científica, e deram origem a diversas descobertas sobre os parâmetros físicos da água do mar em oceano aberto.

Estes dados, referentes a diversas expedições oceanográficas, são compilados pelo NODC da NOAA⁵, e então interpolados com uma resolução horizontal de 1/4° em sua versão mais recente.

A partir destes campos interpolados foram extraídos os valores ao longo da coluna d'água para as coordenadas da região de descarte. Maiores detalhes sobre os dados do WOA13 e sobre os procedimentos de análise, filtragem e interpolação, realizados nesses

³ *Climate Forecast System Reanalysis*. Disponível em <<http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.1/>>. Último acesso em 30 de julho de 2012.

⁴ LOCARNINI, R. A., A. V. MISHONOV, J. I. ANTONOV, T. P. BOYER, H. E. GARCIA, O. K. BARANOVA, M. M. ZWENG, C. R. PAVER, J. R. REAGAN, D. R. JOHNSON, M. HAMILTON, & D. SEIDOV, 2013. *World Ocean Atlas 2013, Volume 1: Temperature*. S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 73, 40 pp. Disponível em: <<http://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/>>.

⁵ *National Oceanographic Data Center (NODC) do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) dos Estados Unidos*.



dados são apresentados no Anexo B. É possível observar que a temperatura da camada superior e a profundidade da termoclina apresentam variações sazonais pequenas, pois nesta porção do globo, como mostra o Diagnóstico do Meio Físico, existe uma reduzida variação na insolação ao longo do ano.

Tabela 3 - Perfis de temperatura e salinidade para a região do Bloco BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas.

TABELA DE PERFIL TS						
ESTAÇÃO DO ANO	Primavera		Verão		Inverno	
DIREÇÃO PREFERENCIAL / INTENSIDADE	ESE menos intensa / WNW mais intensa		ESSE mais intensa;		WNW menos intensa	
Profundidade	Temp (°C).	Salin.	Temp (°C).	Salin.	Temp (°C).	Salin.
0	26,90	36,21	27,98	36,09	26,73	36,27
50	26,76	36,26	27,61	36,18	26,51	36,28
100	26,36	36,47	23,59	36,63	25,78	36,38
200	14,55	35,42	13,72	35,40	15,02	35,60
300	11,16	35,00	10,76	35,01	11,36	35,06
400	8,70	34,73	8,31	34,73	8,94	34,76
500	6,98	34,61	6,91	34,57	7,12	34,56
600	5,83	34,50	5,73	34,51	5,91	34,48
700	5,09	34,52	5,13	34,48	5,07	34,45
800	4,56	34,52	4,77	34,48	4,76	34,49
900	4,45	34,60	4,61	34,54	4,55	34,52
1.000	4,46	34,65	4,48	34,60	4,36	34,63
1.100	4,50	34,70	4,58	34,74	4,49	34,76
1.200	4,56	34,82	4,57	34,81	4,68	34,87
1.300	4,55	34,89	4,55	34,87	4,61	34,91
1.400	4,44	34,94	4,53	34,92	4,59	34,94
1.500	4,41	34,96	4,41	34,96	4,49	34,97
1.600	4,25	34,97	4,13	34,98	4,06	34,99
1.700	4,00	34,98	3,61	34,98	3,89	34,98
1.800	3,77	34,98	3,61	34,97	3,77	34,98
1.900	3,60	34,97	3,63	34,98	3,68	34,98
2.000	3,32	34,98	3,50	34,96	3,39	34,99

2.1.3. *Campo de Correntes*

Os campos de correntes foram gerados a partir da modelagem hidrodinâmica implementada com o Delft3D-FLOW na Bacia de Barreirinhas e adjacências (TETRA TECH, 2015a). O sistema de modelos Delft3D é capaz de simular a circulação hidrodinâmica como resposta a forçantes baroclínicas e barotrópicas, bem como a transferência de quantidade de movimento ao sistema hidrodinâmico decorrente do sistema de ventos. O modelo foi implementado com 20 camadas.

A descrição da modelagem hidrodinâmica é apresentada no Anexo C do relatório de modelagem de derrame de óleo (TETRA TECH, 2015b).

As simulações consideraram quatro condições hidrodinâmicas para máximas e mínimas intensidades nas duas direções predominantes das correntes, com base na metodologia apresentada no Anexo C.

2.1.4. *Domínio Modelado e Batimetria*

Na modelagem realizada, optou-se pela utilização de um conjunto de dados global de alta resolução e que representasse o talude continental norte do Brasil o mais fielmente possível quanto a sua feição geomorfológica e batimétrica. Para nortear a escolha deste conjunto quanto a feição geomorfológica do talude, foram utilizados dados de profundidade oriundos de levantamentos topobatimétricos pertencentes à base da TETRA TECH.

Dentre os conjuntos de dados disponíveis, o GEBCO⁶, disponibilizado pela BODC⁷, apresentou a melhor representação da região além de possuir a melhor resolução (928 m) dentre os conjuntos de dados avaliados.

⁶ *General Bathymetric Chart of the Oceans.*

⁷ *British Oceanographic Data Center.*



Para os cenários simulados neste estudo, considerando as deposições no assoalho oceânico, foi definida uma grade *habitat*⁸ com a quantidade máxima de pontos permitida pelo modelo DREAM (1.000 x 1.000 pontos), com resolução de 20 m (y) X 20 m (x), e 100 camadas na vertical. A Figura 2 apresenta a grade *habitat* utilizada.

Ressalta-se que com apenas uma grade de alta resolução foi possível cobrir todo o domínio de modelagem (área de abrangência total) considerando o corte de espessura adotado neste estudo.

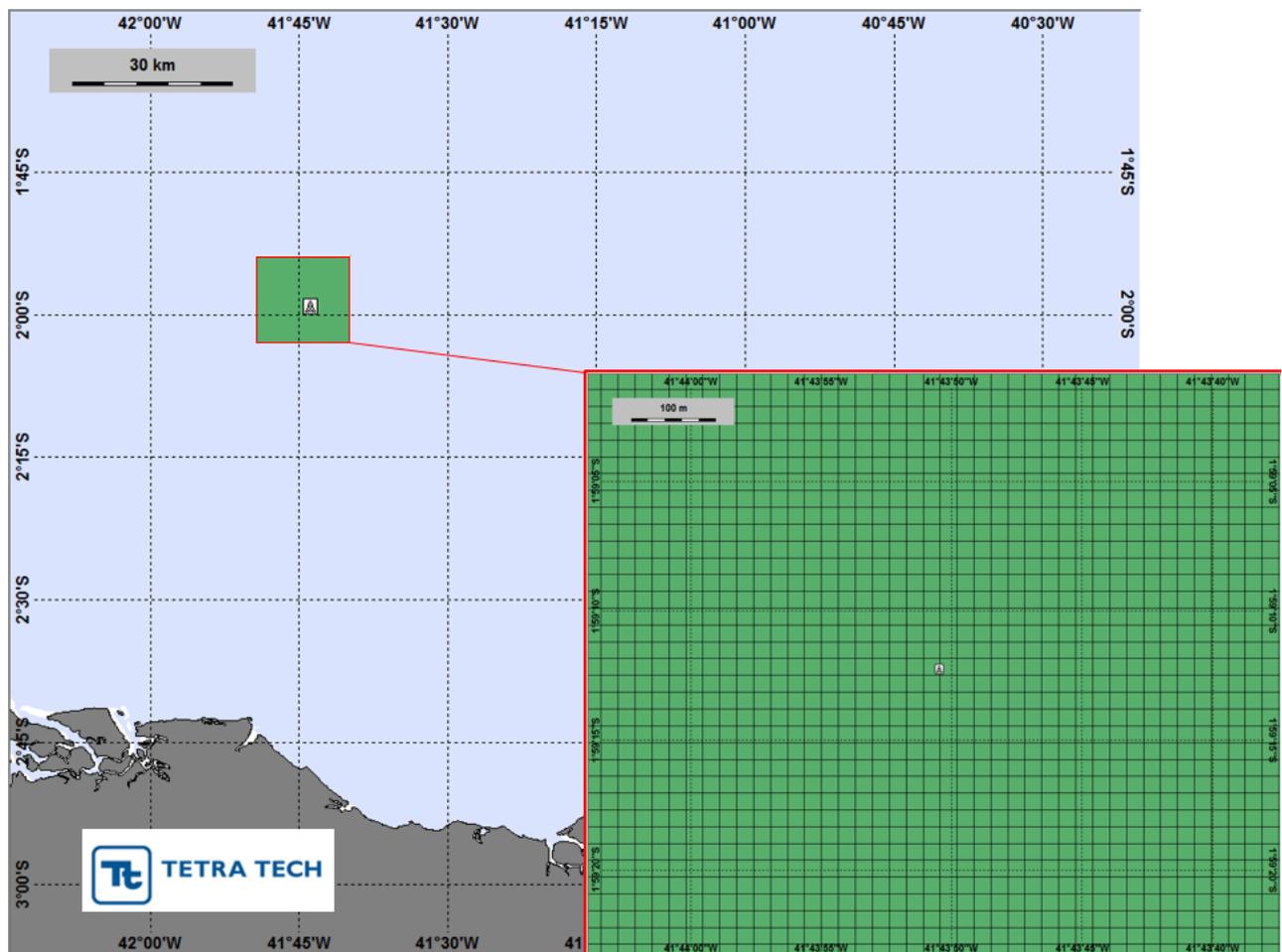


Figura 2 - Grade *habitat*: 1.000 x 1.000 pontos, resolução de 20 m no eixo X e 20 m no eixo Y.

⁸ Grade que define quais as células ou blocos correspondem à área de terra e quais à área de água, com a interface definida pela linha de costa. Grade na qual o modelo calcula os processos e apresenta os resultados.

2.1.5. Especificações dos Processos de Perfuração/Descarte e Caracterização do Material Descartado

O processo de perfuração é dividido em duas etapas: sem *riser* e com *riser*. Até a instalação do *riser*, não existe retorno de fluido de perfuração para a sonda e todo o material retirado do poço é descartado no fundo do mar durante a própria atividade de perfuração, depositando-se próximo à cabeça de poço. A perfuração com *riser* corresponde à etapa com retorno de fluido de perfuração e cascalhos para a sonda para o devido tratamento antes do material ser descartado conforme os padrões legais definidos, sendo este descarte realizado na superfície do mar.

A perfuração no Bloco será composta por 5 fases distintas. O início da perfuração (Fase I) se dará com um poço de diâmetro 36” e intervalo de cerca de 60 m, com a utilização de fluido de perfuração de base aquosa (*High Vis Gel Sweeps*). Na Fase II, a perfuração se dá com uma broca de 26” de diâmetro, utilizando também o mesmo tipo fluido de perfuração aquoso, perfazendo um intervalo de 900 m.

A perfuração com *riser*, Fases III, IV e V, ocorrerá com a utilização de um fluido sintético. A Fase III (17½”) terá intervalo de 1.450 m, a Fase IV (12¼”) terá 600 m, e a Fase V (8½”) terá intervalo de 1.050 m.

Adicionalmente, na modelagem consideram-se os descartes das fases sem *riser* efetuados 5 m acima do fundo do mar. Enquanto que, os descartes das fases com *riser*, foram efetuados na superfície do mar através de uma tubulação (no ponto de saída) de 500,0 mm (diâmetro interno) e ângulo de 135º em relação ao costado.

Em virtude de se tratar do primeiro poço exploratório no bloco, nas simulações de descarte de cascalhos, foi utilizada a granulometria de bibliografia especializada (Tabela 4 e Tabela 5), sendo nove intervalos de classe de tamanhos para os cascalhos perfurados com fluido de base aquosa e onze intervalos de classe de tamanhos para os cascalhos perfurados com fluido de base sintética.

Para os fluidos foi utilizada a granulometria de seus principais constituintes sólidos (bentonita e baritina), com base em banco de dados da TETRA TECH, conforme a Tabela 6.



Tabela 4 - Classes granulométricas para cascalhos perfurados com fluido de base aquosa (adaptado de DAMES & MOORE, 1978 apud BRANDSMA & SMITH, 1999⁹).

CLASSE	FRAÇÃO DE VOLUME (%)	DIÂMETRO DA PARTÍCULA (µm)
1	8,0	0,99
2	6,0	3,48
3	7,0	12,53
4	3,0	41,07
5	2,0	107,67
6	18,0	217,15
7	16,0	616,79
8	15,0	1.049,53
9	25,0	3.585,12

Tabela 5 - Classes granulométricas para cascalhos perfurados com fluido de base sintética (adaptado de O'REILLY, et.al., 1988 apud BRANDSMA & SMITH, 1999⁸).

CLASSE	FRAÇÃO DE VOLUME (%)	DIÂMETRO DA PARTÍCULA (µm)
1	13,3	33.838,12
2	15,7	23.486,41
3	16,7	19.032,25
4	15,8	15.048,01
5	13,3	12.555,51
6	10,1	10.271,51
7	6,9	8.495,93
8	4,2	6.894,24
9	2,3	5.464,35
10	1,1	4.204,99
11	0,7	3.823,21

⁹ Os autores fornecem tabela com as velocidades de queda e densidade das partículas, desta forma, a granulometria foi estimada com base nestas informações utilizando a formulação de Watson (1969).

Tabela 6 - Classes granulométricas para a bentonita e baritina.

GRANULOMETRIA (CLASSIFICAÇÃO DE SHEPARD, 1954)	INTERVALO DO TAMANHO DE GRÃO (mm)		%	
			BENTONITA	BARITINA
% Areia Muito Grossa:	2,0000	1,00000	0,3	0,0
% Areia Grossa:	1,0000	0,50000	0,3	0,2
% Areia Média:	0,5000	0,25000	0,6	0,4
% Areia Fina:	0,2500	0,12500	2,7	2,6
% Areia Muito Fina:	0,1250	0,06250	7,7	10,7
% Silte Grosso:	0,0625	0,03120	40,9	44,9
% Silte Médio:	0,0312	0,01560	22,6	17,5
% Silte Fino:	0,0156	0,00780	14,4	11,2
% Silte Muito Fino:	0,0078	0,00390	6,7	6,9
% Argila:	0,0039	0,00195	3,9	5,8

A Tabela 7 apresenta os volumes e a caracterização de cascalhos e fluidos de perfuração para o presente estudo, segundo informações fornecidas pela BP. A composição dos fluidos de perfuração encontra-se no Anexo D. Esta composição foi baseada em informações genéricas disponíveis no banco de dados da TETRA TECH para fluidos conceitualmente semelhantes, uma vez que não se dispõe da composição específica dos que serão efetivamente utilizados.

**Tabela 7 - Especificações do descarte de cascalhos e fluidos de perfuração para o Bloco BAR-M-346.**

FASE	INTERV. MEDIDO (m)	DIÂMETRO DA FASE (POL)	PROF. DO DESCARTE (m)	DURAÇÃO DO DESCARTE (horas)	MATERIAIS	TIPO DE FLUIDO DE PERFURAÇÃO	VOLUME DESCARTADO (m ³)	PORCENTAGEM ADERIDA AO CASCALHO (%)	DENS. MÉDIA
I	60	36"	5 m acima do fundo do mar	16,0	Cascalhos	–	59,10	–	2.650,0 kg/m ³
					Fluido de Perfuração	PHB (<i>High Vis Gel Sweeps</i> , Base Aquosa)	178,88	100%	1,03 g/cm ³
II	900	26"	5 m acima do fundo do mar	40,0	Cascalhos	–	462,42	–	2.650,0 kg/m ³
					Fluido de Perfuração	PHB (<i>High Vis Gel Sweeps</i> , Base Aquosa)	804,94	100%	1,03 g/cm ³
III	1.450	17½"	Superfície	160,0	Cascalhos	–	232,92	–	2.650,0 kg/m ³
					Fluido de Perfuração	SBM (Base Sintética)	107,14	5,96	1,10 g/cm ³
IV	600	12¼"	Superfície	97,0	Cascalhos	–	45,99	–	2.650,0 kg/m ³
					Fluido de Perfuração	SBM (Base Sintética)	21,16	1,18	1,15 g/cm ³
V	1.050	8½"	Superfície	220,0	Cascalhos	–	37,37	–	2.650,0 kg/m ³
					Fluido de Perfuração	SBM (Base Sintética)	17,19	0,96	1,20 g/cm ³

2.1.6. Duração das Simulações

A duração das simulações foi definida considerando a duração total de descarte (soma da duração de descarte de cada fase) acrescida de três dias, totalizando 25 dias de simulação. Este tempo foi suficiente para a parcela significativa de partículas depositar-se no assoalho oceânico com espessuras acima do corte considerado na modelagem.

Ressalta-se que também foram conduzidos testes aumentando a duração da simulação. A área de abrangência depositada manteve-se inalterada com o aumento de 25 dias para 30 e 35 dias, demonstrando que não haveria necessidade de um incremento da duração máxima da simulação.

2.1.7. Critérios de Corte Adotados na Apresentação dos Resultados

Na apresentação dos resultados, foram adotados os critérios de corte abaixo descritos para deposição (espessuras) e coluna d'água (concentração).

2.1.7.1. Depósitos no Assoalho Oceânico

A escolha das espessuras de corte na apresentação dos resultados foi embasada no Termo de Referência CGPEG/DILIC/IBAMA 30/14, no qual no item II.6.3 indica-se a espessura mínima de 0,01 mm. Em todas as figuras de deposição, seguindo a orientação do Termo de Referência, são apresentados os contornos de 0,01; 0,1; 1,0; 10,0 e 1.000 mm.

No entanto, com base no estudo Kjeilen-Eilertsen *et al.* (2004), os quais apresentam uma revisão bibliográfica dos limites mínimos de espessura e efeitos nocivos em diversos grupos e espécies de organismos bentônicos, são observados quatro efeitos críticos para análise: mortalidade, redução do crescimento da espécie, redução do assentamento larval e mudanças na composição faunística.



Dos trabalhos analisados, o estudo de Holthaus *et al.* (2003 *apud* Kjeilen-Eilertsen *et al.*, 2004) estima a espessura mínima para a qual o soterramento não seria considerado nocivo à comunidade bentônica com base na análise de curvas SSD (*Species Sensitivity Distribution*). Os valores obtidos foram de 9,6 mm para sedimentos exógenos (não-nativos) e 6,5 mm para sedimentos endógenos (nativos).

Com base nessa análise, no estudo de Kjeilen-Eilertsen *et al.* (op. cit.) ainda é sugerido que o limite em que já não são sentidos efeitos nocivos seja de 5,0 mm, podendo este ser utilizado como limiar para estudos de modelagem de cascalho e fluidos de perfuração.

Adicionalmente, segundo Henrik *et al.* (2006), o limite do PNEC (*Predicted No Effect Concentration or Predicted No Effect Change*) para soterramento de organismos em operações de descarte de cascalhos e fluidos de perfuração é de 6,5 mm.

Conclui-se que, para o descarte de cascalhos e fluidos de perfuração, efetuados em região *offshore*, baseado nas referências bibliográficas apresentadas acima, o limiar de 1 mm representa uma espessura bastante conservadora, sendo 15,38% dos limites usualmente utilizados e descritos.

2.1.7.2. Concentração na Coluna D'Água

Apesar de Smit *et al.* (2006) ter identificado, através da análise de diversos estudos prévios realizados para identificar o efeito do descarte de cascalho e fluidos aderidos nos organismos nectônicos, que cerca de 10 mg/L (10 ppm) é o menor limiar ao qual os organismos estão sujeitos a alterações significativas¹⁰, em descartes com fluido de base água a adoção de 5 mg/L como limiar teria por objetivo uma abordagem conservadora.

Em virtude da ausência de padrão definido de critério de corte para o parâmetro neste tipo de análise, foi considerado um valor de 50% do citado no estudo mencionado anteriormente - 5 mg/L (5 ppm) - o qual vem sendo utilizado em outros relatórios elaborados pela TETRA TECH.

¹⁰ Com base na toxicidade das substâncias químicas e nos efeitos físicos devido às partículas em suspensão, alterações como redução de crescimento de algas, filtração, alimentação são observados.

2.1.8. Resumo dos Cenários Simulados

Neste estudo foram considerados quatro cenários distintos baseados na direção preferencial e relativa intensidade das correntes, conforme mostra a Tabela 8 (apresentado em detalhe no Anexo C).

Tabela 8 - Cenários simulados para o descarte de cascalhos e fluidos de perfuração para o Bloco BAR-M-346. A representatividade destes cenários apresentados pode ser verificada no Anexo C.

PONTO	DIREÇÃO PREFERENCIAL DA CORRENTE	CLASSIFICAÇÃO DA INTENSIDADE
P1	WNW	Menor intensidade
		Maior intensidade
	ESE	Menor intensidade
		Maior intensidade



3. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Este capítulo apresenta os resultados das simulações de modelagem do descarte de cascalhos e fluidos para a perfuração no Bloco BAR-M-346.

Para melhor visualização e interpretação dos resultados de deposição no assoalho oceânico e na coluna d'água, optou-se por apresentá-los separadamente em: “Depósitos no Assoalho Oceânico” e “Concentrações na Coluna D'Água”.

3.1. DEPÓSITOS NO ASSOALHO OCEÂNICO

A Tabela 9 fornece as características da deposição de material calculadas para cada cenário simulado, considerando os descartes a partir do poço selecionado para o presente estudo. A tabela lista as áreas cobertas por depósitos de sedimento com espessuras iguais ou maiores que 1.000 mm; 10,0 mm; 1,0 mm; 0,1 mm e 0,01 mm, além das espessuras máximas depositadas.

Observa-se que os cenários simulados sob ação de correntes menos intensas resultaram em menor dispersão de partículas, no entanto, as maiores espessuras foram calculadas para os cenários sob ação de correntes mais intensas. Vale ressaltar que, considerando o limiar de 1 mm, as áreas de deposição são reduzidas significativamente.

Tabela 9 - Resumo dos resultados de deposição no assoalho oceânico para o Bloco BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas considerando todas as fases de perfuração.

BLOCO	DIREÇÃO	CLASSIFICAÇÃO	ÁREA ≥ 0,01 mm (km ²)	ÁREA ≥ 0,1 mm (km ²)	ÁREA ≥ 1 mm (km ²)	ÁREA ≥ 10 mm (km ²)	ÁREA ≥ 1.000 mm (km ²)	ESPESSURA (mm)
BAR-M-346	ESE	Menor Intensidade	0,686	0,481	0,211	0,003	0,0004	2.097,72
		Maior Intensidade	0,955	0,550	0,214	0,009	0,0008	2.313,57
	WNW	Menor Intensidade	0,836	0,652	0,228	0,002	0,0004	2.497,62
		Maior Intensidade	1,083	0,688	0,267	0,002	0,0004	2.824,43

Uma vez que o modelo DREAM não inclui cálculos de estabilidade dos depósitos no assoalho oceânico, abaixo se apresenta o cálculo do ângulo máximo em que um material granular é empilhado antes de desmoronar, sendo que para o cascalho com areia este ângulo é de, aproximadamente, 30°. Cada célula da grade tem resolução de 20 metros e o ângulo é calculado através da seguinte equação:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{h}{d} \right) \quad (\text{Eq. 3-1})$$

onde,

h é a altura ou espessura máxima,

d é o tamanho da célula da grade do modelo¹¹.

A Tabela 10 apresenta a espessura máxima e a relação h/d da deposição para cada um dos cenários simulados. $\tan(\alpha)$ deve ser igual ou inferior a 0,60 (30°) para ser estável. Se h/d é maior do que 0,60, provavelmente a espessura é maior do que a base e o depósito formado pelo material tende a “escorregar”.

Todos os cenários apresentaram uma condição estável, com h/d inferior a 0,60. Este ângulo de estabilidade é uma estimativa e se devem considerar todas as forçantes, além de gravidade, que podem acelerar o depósito do material por deslizamento, como a intensificação da velocidade da corrente e a mudança de direção.

Tabela 10 - Relação para cada cenário, considerando a máxima deposição de espessura e resolução da célula de grade.

POÇO	DIREÇÃO	CLASSIFICAÇÃO	Espessura (mm)	D (mm)	H/D
BAR-M-346	ESE	Menor Intensidade	2.097,72	20.000	0,10
		Maior Intensidade	2.313,57		0,11
	WNW	Menor Intensidade	2.497,62		0,12
		Maior Intensidade	2.824,43		0,14

A seguir, são apresentados os resultados obtidos nas simulações para os depósitos no assoalho oceânico de forma gráfica.

¹¹ Grade *habitat* apresentada no Item II.1.4



As Figuras 3 a 6 apresentam as espessuras previstas ao final de toda a operação de descarte de partículas no Bloco BAR-M-346, para as cinco fases de perfuração consideradas. Os maiores valores de espessura são referentes ao cenário WNW – mais intenso, com aproximadamente 282,4 cm. A distância linear máxima entre o ponto de descarte e o limite de alcance da dispersão do cascalho para cada cenário, considerando espessuras superiores a 0,01 mm, foram de: 1,89 km (ESE-Menos Intenso); 0,81 km (ESE 0 Mais Intenso); 1,05 km (WNW – Menos Intenso) e 1,21 km (WNW – Mais Intenso), para as espessuras superiores a 0,01 mm. As distâncias para as demais classes de espessuras são apresentadas na Tabela 13.

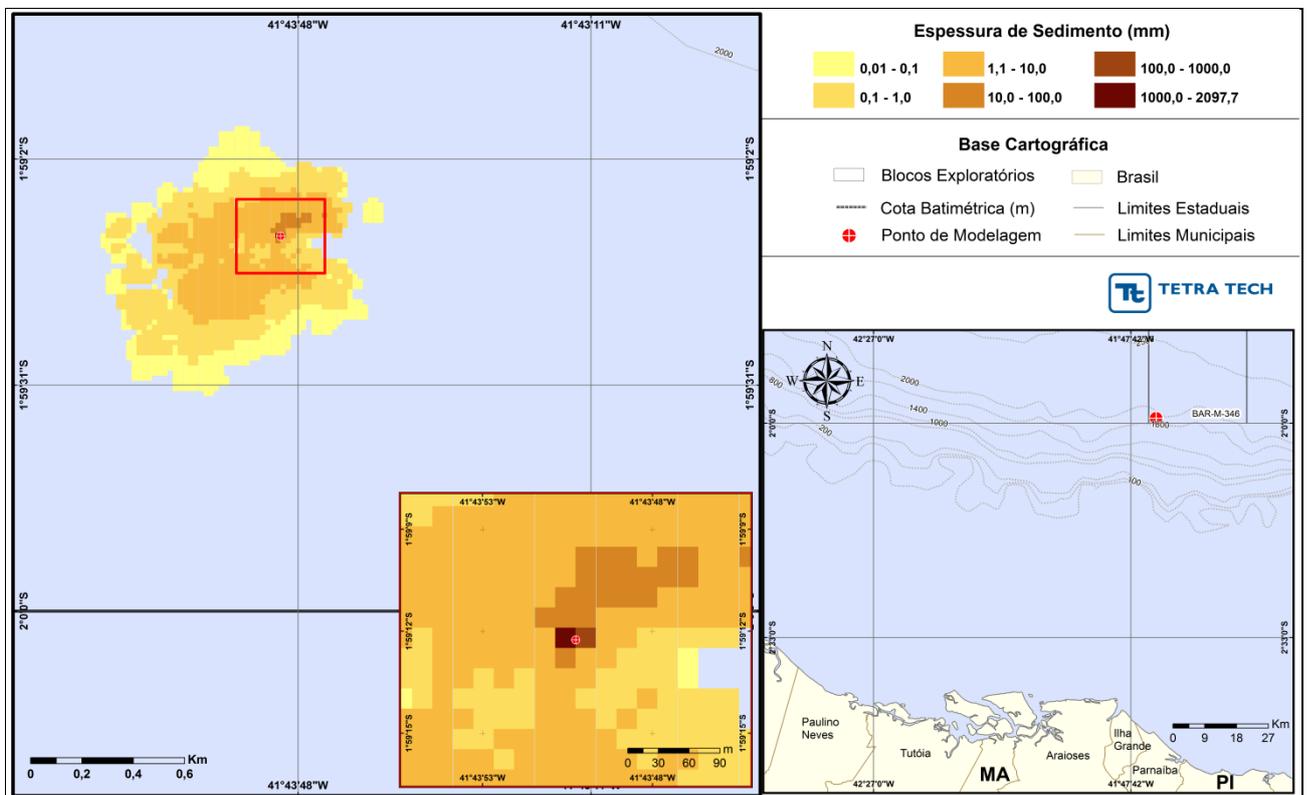


Figura 3 - Área de abrangência e espessuras médias calculadas para o descarte de partículas ao final das operações de descarte do Poço BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas, para o cenário ESE – menos intenso.

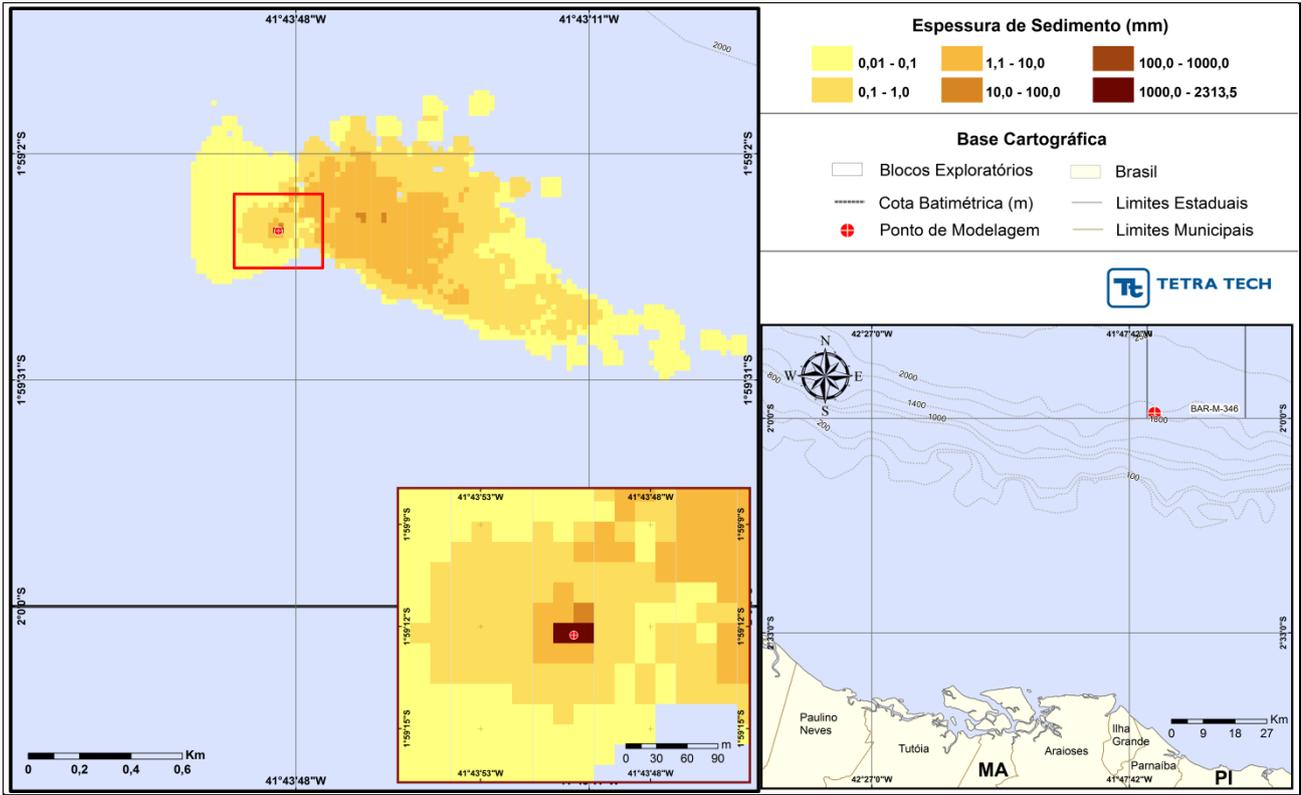


Figura 4 - Área de abrangência e espessuras médias calculadas para o descarte de partículas ao final das operações de descarte do Poço BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas, para o cenário ESE – mais intenso.

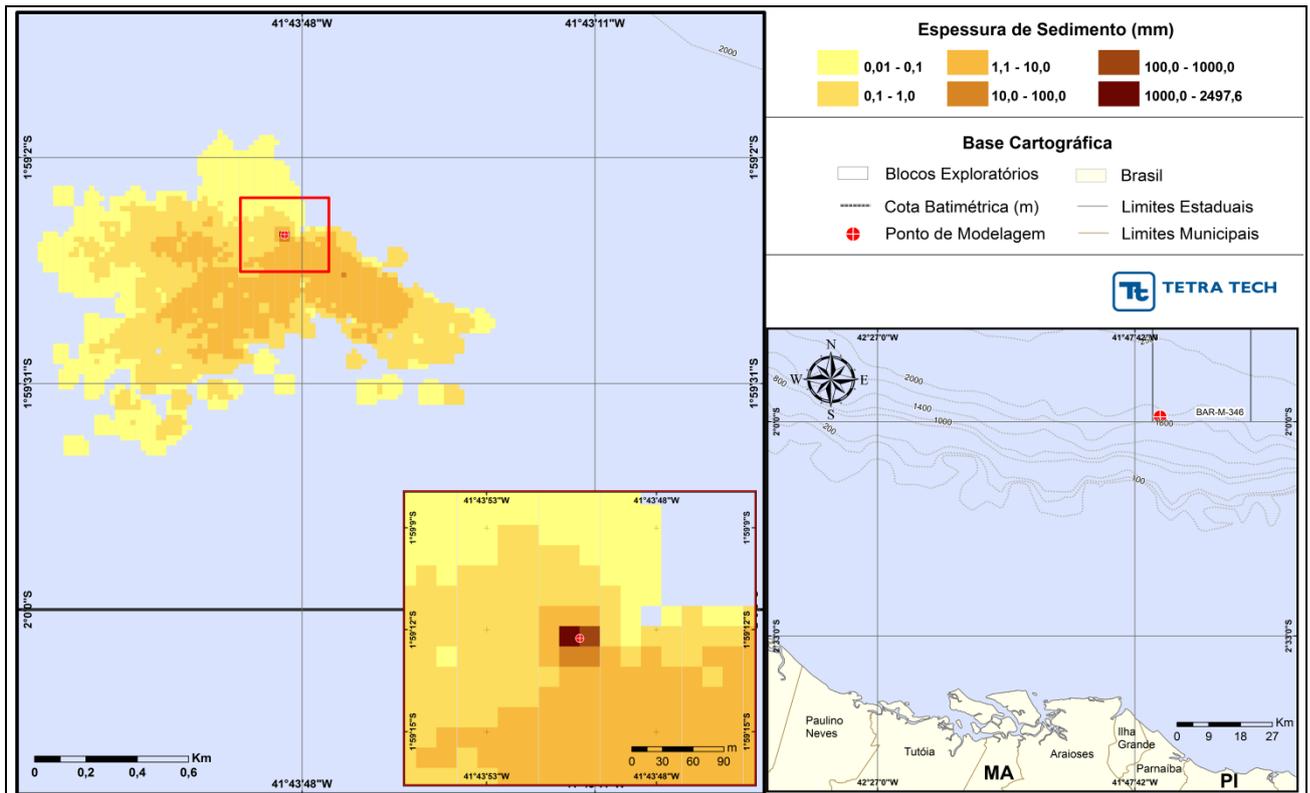


Figura 5 - Área de abrangência e espessuras médias calculadas para o descarte de partículas ao final das operações de descarte do Poço BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas, para o cenário WNW – menos intenso.

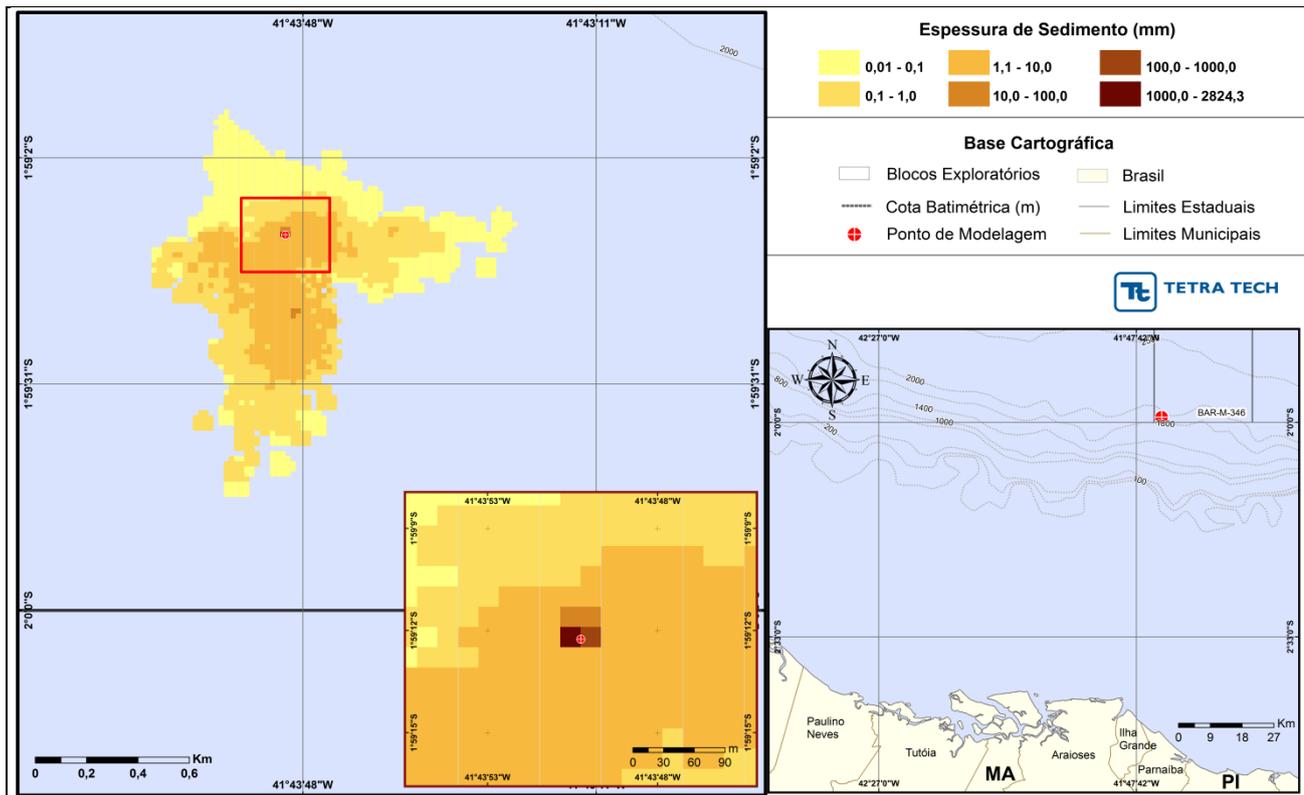


Figura 6 - Área de abrangência e espessuras médias calculadas para o descarte de partículas ao final das operações de descarte do Poço BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas, para o cenário WNW – mais intenso.

3.1.1. Área de Abrangência Total

A Figura 7 apresenta a área de abrangência total, considerando a integração dos resultados obtidos para os quatro cenários simulados (ESE e WNW – mais intenso e menos intenso) no Bloco BAR-M-346. O resumo dos resultados segue na Tabela 11.

Tabela 11 - Resumo das áreas de abrangência com espessuras iguais ou superiores a 0,01 mm e 1,0 mm para o Poço BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas – resultado integrado.

POÇO	Área ≥ 0,01 mm (km ²)	Área ≥ 1,0 mm (km ²)
BAR-M-346	3,56	0,92

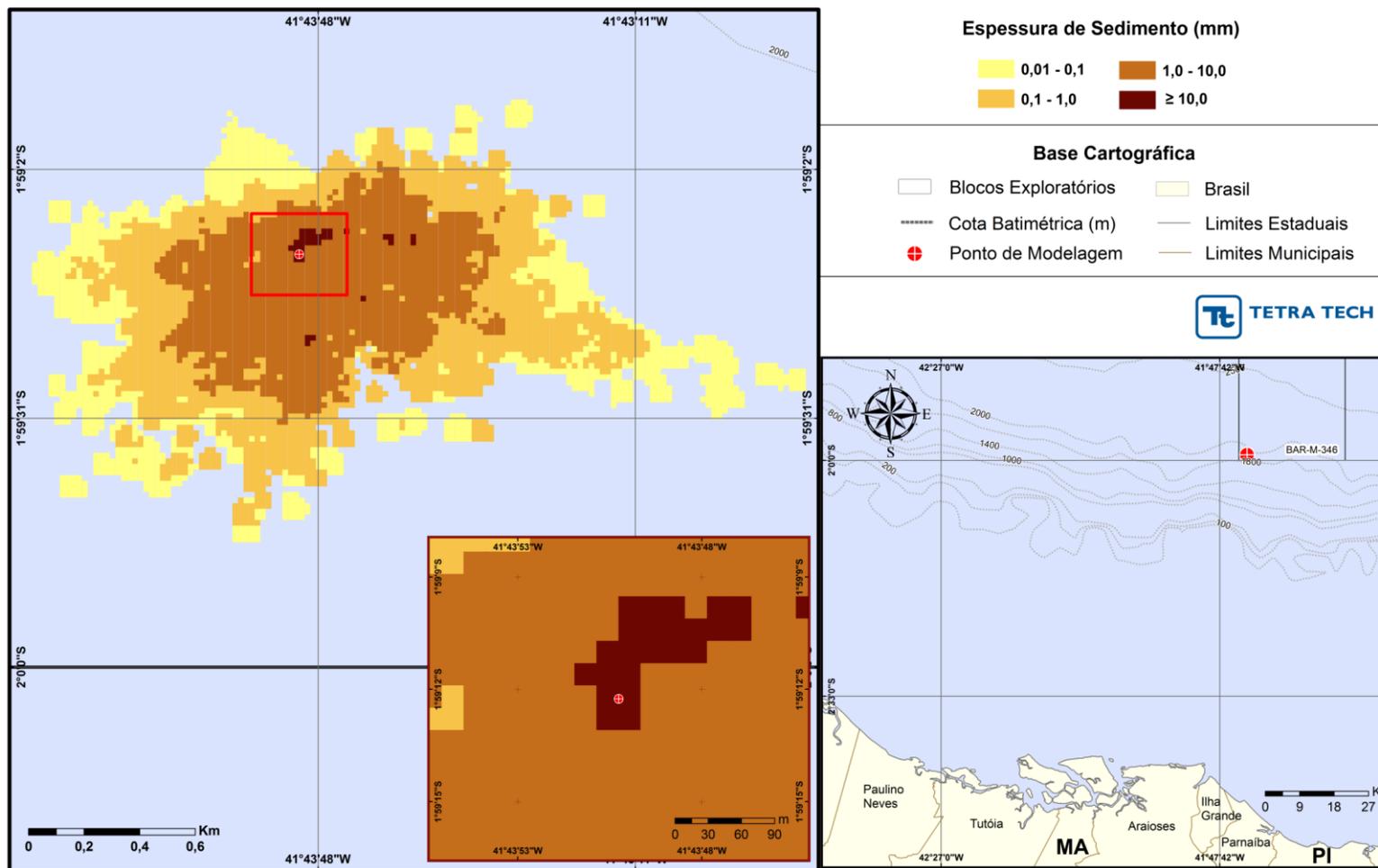


Figura 7 - Área de abrangência total considerando espessuras iguais ou superiores a 0,01; 0,1; 1,0 e 1,0 mm, ao final das operações de descarte no Bloco BAR-M-356, Bacia de Barreirinhas.

3.2. CONCENTRAÇÃO NA COLUNA D'ÁGUA

Os resultados do descarte na coluna d'água são apresentados através da concentração máxima de sólidos na água ao longo de todo o período simulado, representando a área de abrangência da pluma de sólidos em suspensão, ou seja, todas as trajetórias das plumas foram integradas pelas concentrações máximas encontradas em cada ponto de grade. Assim, para cada passo de tempo da simulação, registrou-se o valor máximo de concentração em cada ponto de grade, e ao final de todo o período, extraiu-se a máxima de todas as máximas obtidas.

Os resultados consideram o critério de corte de 5 mg/L, como informado no Subitem 2.1.7.2. A Tabela 12 apresenta as concentrações máximas calculadas e área total das plumas (integração de todo o período simulado). Observa-se que a maior concentração (~169 mg/L) é referente ao cenário ESE – menos intenso, que também apresentou a menor área varrida (0,37 km²), o que induz à conclusão de menor dispersão do efluente em função da dinâmica local.

Ressalta-se que as maiores concentrações estão localizadas próximas ao ponto de descarte e sua permanência na coluna d'água está limitada ao período do próprio descarte.

Tabela 12 - Resumo dos resultados de concentração máxima na coluna d'água (integração dos resultados ao longo de todo o período simulado) para o Bloco BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas – por cenário simulado.

POÇO	DIREÇÃO	CLASSIFICAÇÃO	CONCENTRAÇÃO (mg/L)	ÁREA TOTAL (km ²) PARA CONCENTRAÇÕES ≥ 5 mg/L
BAR-M-346	ESE	Menor Intensidade	168,92	0,37
		Maior Intensidade	112,61	0,40
	WNW	Menor Intensidade	112,61	0,50
		Maior Intensidade	112,61	0,51



A seguir, da Figura 8 a Figura 11 são apresentados os resultados, na forma gráfica, das concentrações de sólidos na coluna d'água para os descartes de todas as Fases de perfuração. É importante ressaltar que esses resultados não correspondem a instantâneos, mas sim à integração no tempo durante o período total de simulação. O objetivo desta análise é determinar a área impactada e quais foram as concentrações máximas obtidas durante a simulação.

Observa-se que as plumas de fluidos de perfuração concentram-se ao longo de toda coluna d'água, seguindo a orientação preferencial das correntes nestas camadas, com maiores concentrações concentradas nas camadas mais próximas à superfície.

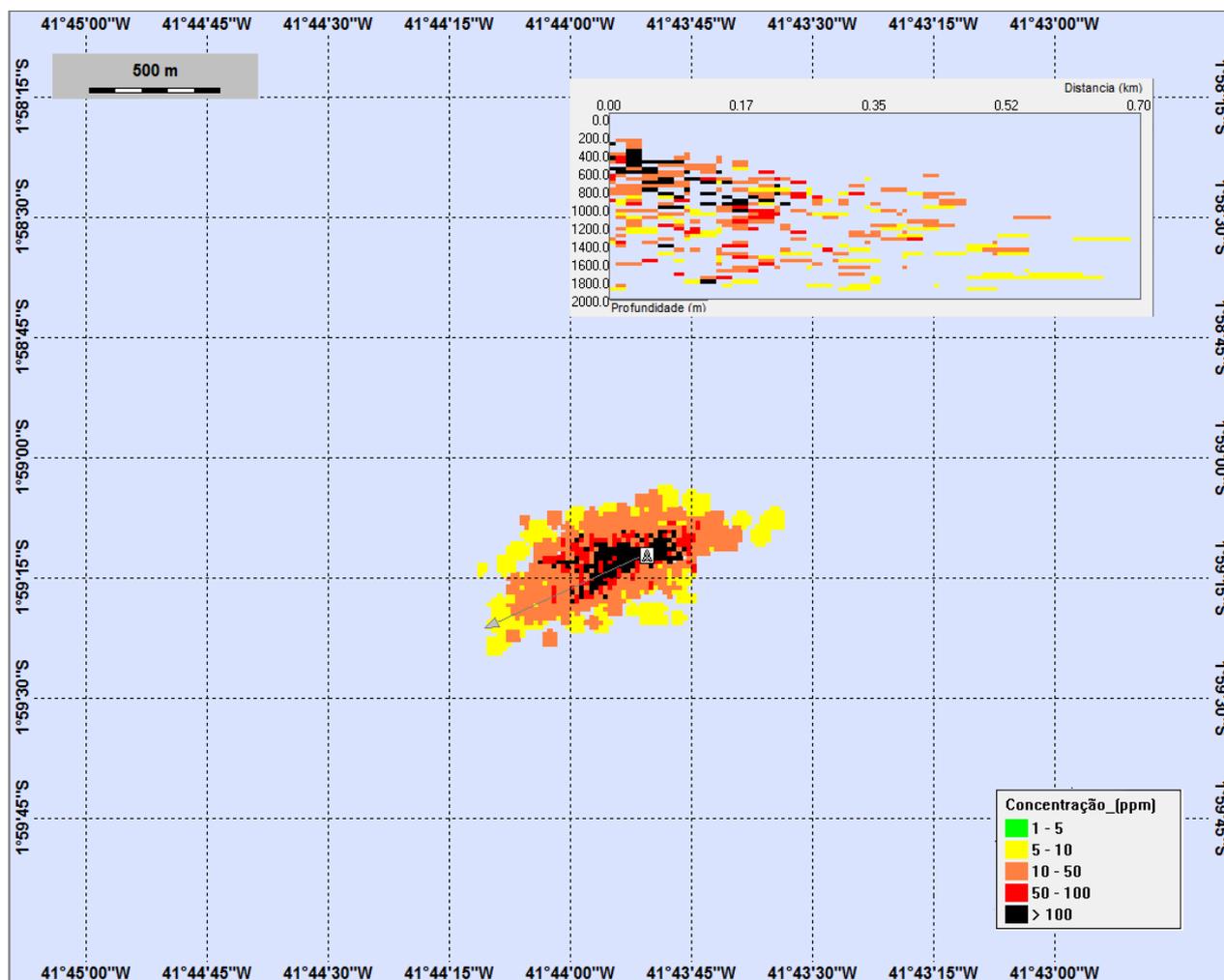


Figura 8 - Concentração máxima de sólidos na coluna d'água para todo o período de simulação e para todas as Fases de descarte do Bloco BAR-M-346: visão em planta e perfil. Cenário corrente ESE – menos intenso.

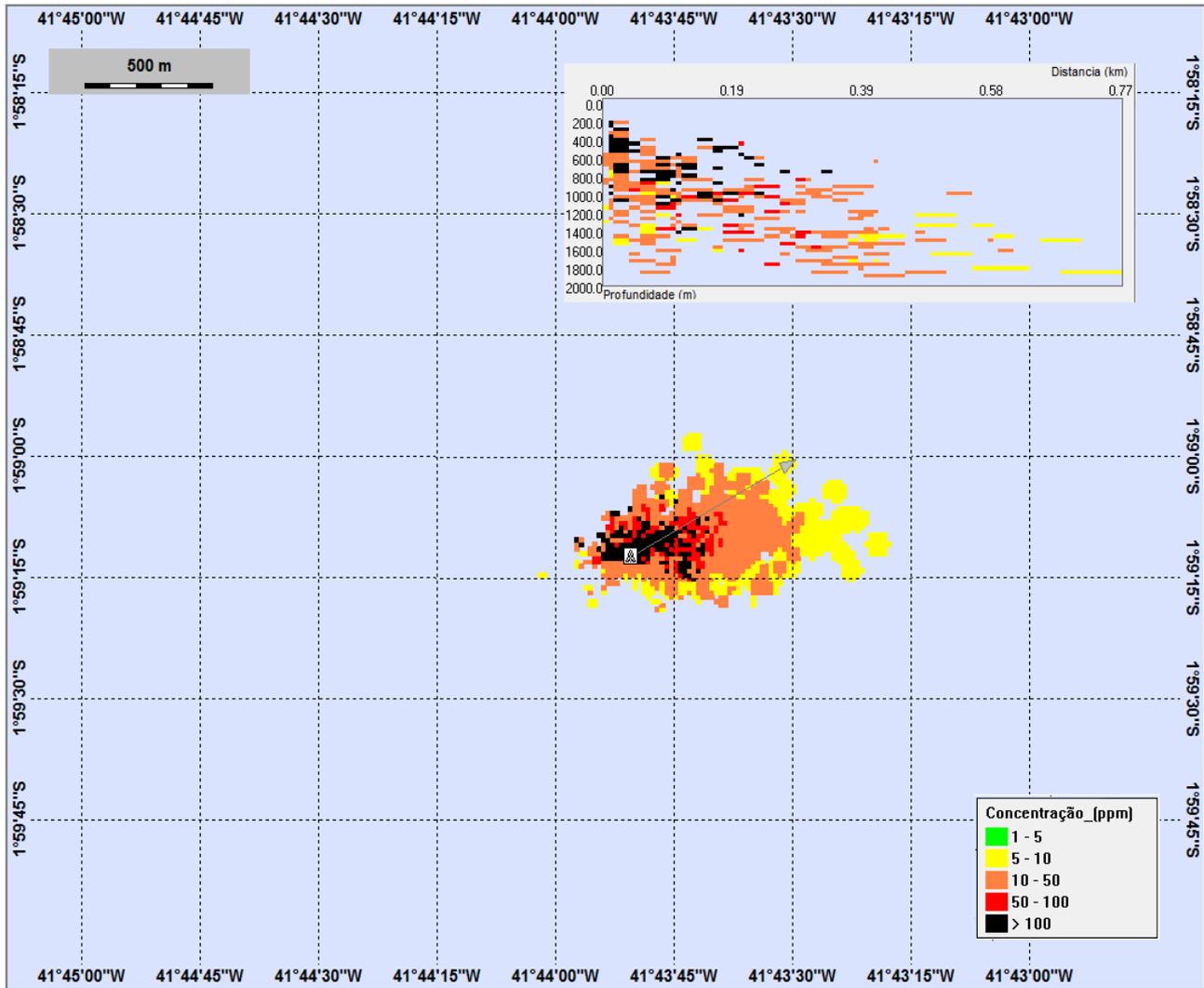


Figura 9 - Concentração máxima de sólidos na coluna d'água para todo o período de simulação e para todas as Fases de descarte do Bloco BAR-M-346: visão em planta e perfil. Cenário corrente ESE – mais intenso.

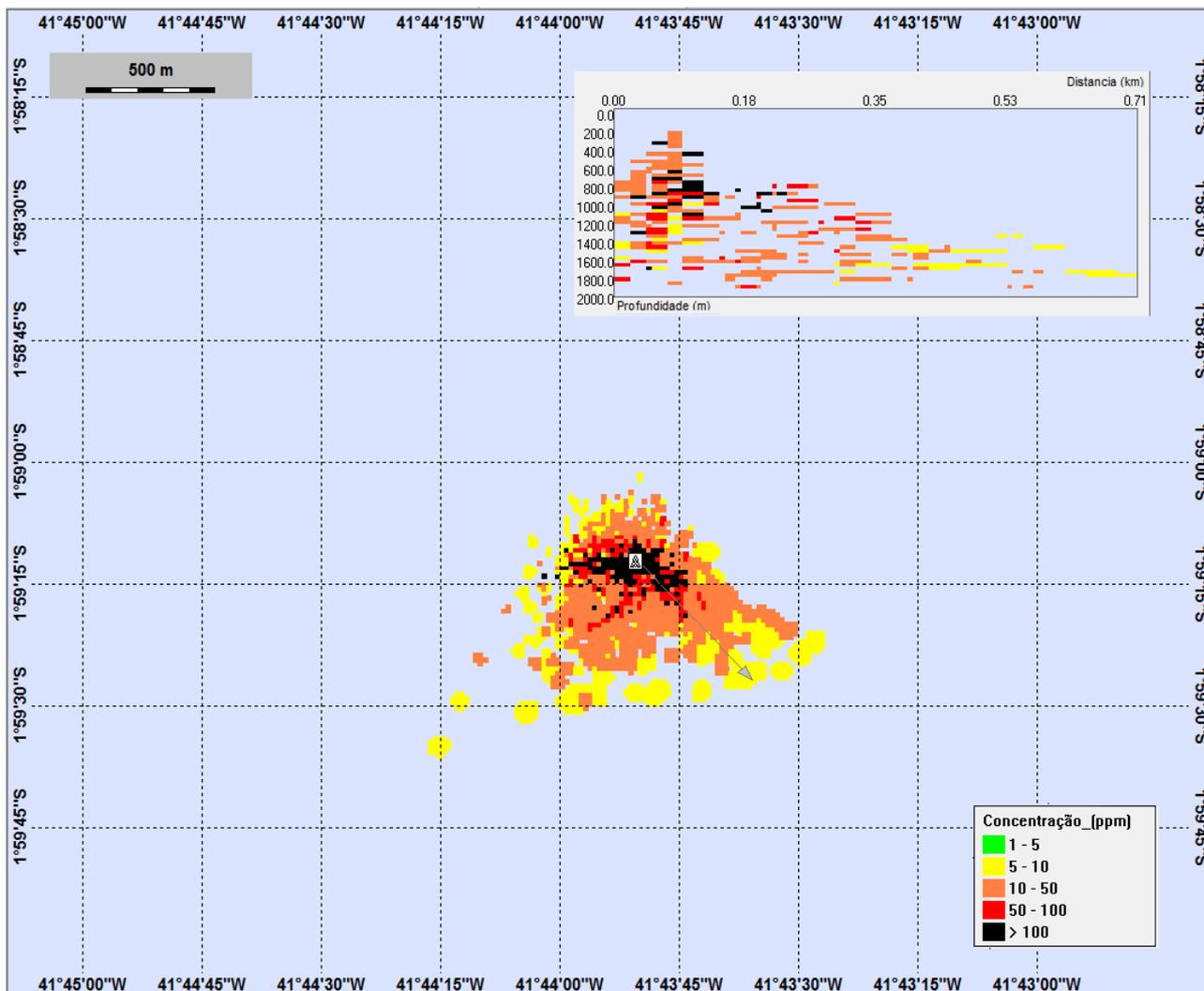


Figura 10 - Concentração máxima de sólidos na coluna d'água para todo o período de simulação e para todas as Fases de descarte do Bloco BAR-M-346: visão em planta e perfil. Cenário corrente WNW – menos intenso.

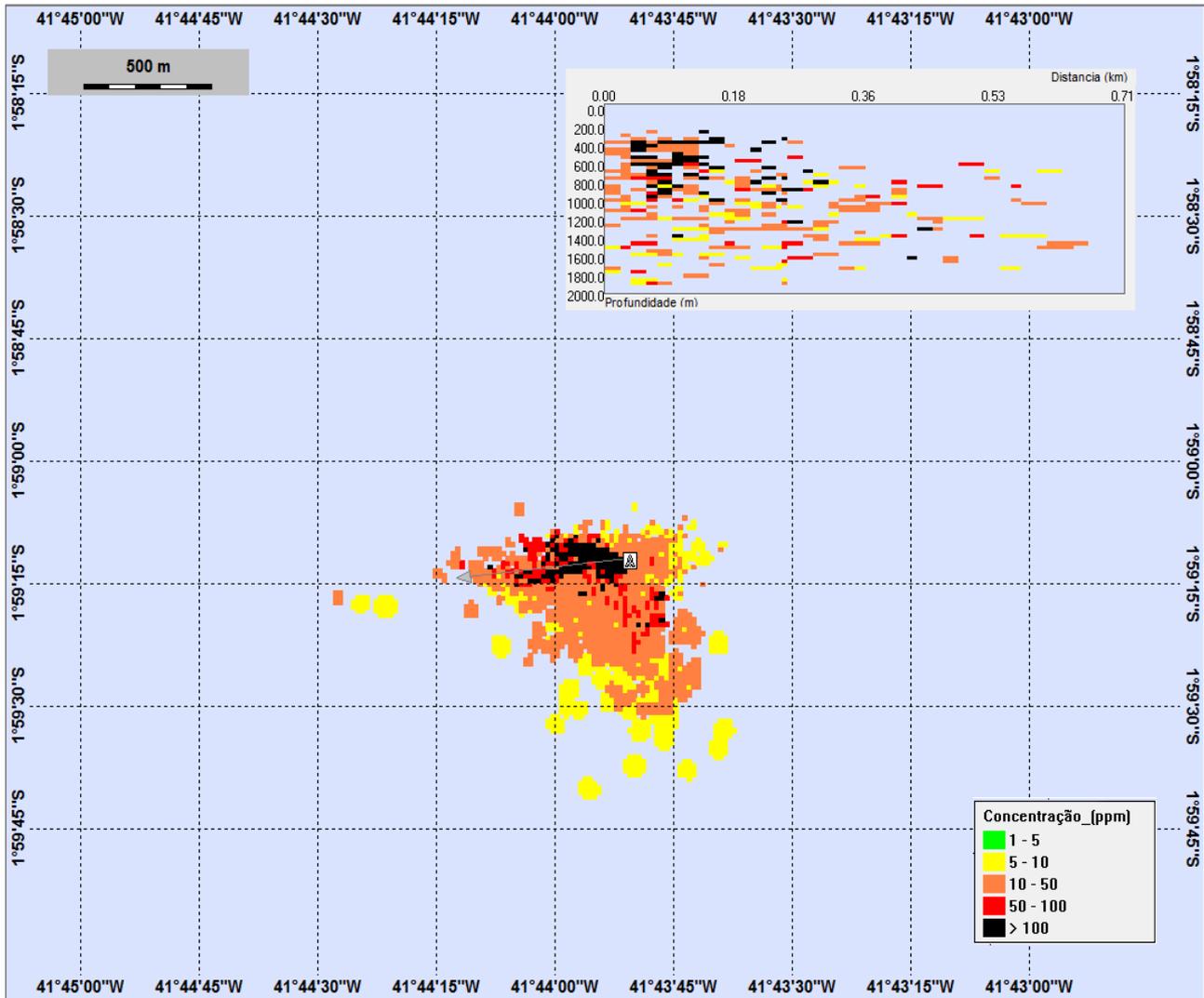


Figura 11 - Concentração máxima de sólidos na coluna d'água para todo o período de simulação e para todas as Fases de descarte do Bloco Poço BAR-M-346: visão em planta e perfil. Cenário corrente WNW – mais intenso.



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram realizadas simulações numéricas do descarte de cascalhos e fluidos de perfuração projetados para a operação de perfuração no Bloco BAR-M-346.

Neste estudo foi considerado um poço, localizado no vértice do Bloco. O projeto de poço analisado prevê cinco fases de perfuração, sendo as Fases I e II sem *riser* e as demais fases (Fases III a V) com *riser* (descarte na superfície do mar). A modelagem foi conduzida com a utilização de fluido base aquosa nas fases sem *riser* e com fluido base sintética nas fases com *riser*.

Nas simulações de descarte de cascalhos foi utilizada a granulometria de bibliografia especializada, sendo nove intervalos de classe de tamanhos para os cascalhos perfurados com fluido de base aquosa e onze intervalos de classe de tamanhos para os cascalhos perfurados com fluido de base sintética. Para os fluidos foi utilizada a granulometria dos seus principais constituintes sólidos (bentonita e baritina).

Toda a avaliação foi conduzida através da utilização de um sistema de modelos computacionais conhecido como DREAM, desenvolvido pela SINTEF. O campo de correntes tridimensional, característico dos padrões de circulação na região, foi obtido a partir do Delft3D-FLOW, implementado pela equipe de modelagem hidrodinâmica da TETRA TECH.

A definição dos períodos simulados levou em consideração a extensão da área de abrangência e a espessura dos depósitos dos sólidos em casos extremos de corrente. Desta forma, foram considerados períodos de correntes mais intensas, que propiciam a formação de menores pilhas de sólidos no assoalho oceânico e maiores áreas de abrangência. Tendo em vista maiores espessuras depositadas, também foram considerados períodos de correntes menos intensas, que propiciam menores áreas de abrangência. Desta forma, com base nas análises das correntes, para as duas direções predominantes (ESE e WNW), foram selecionadas duas condições: correntes mais intensas e correntes menos intensas.

É válido destacar que algumas considerações feitas para a modelagem permitem inferir que os resultados apresentados são, na realidade, mais críticos que os esperados durante a perfuração, uma vez que foram considerados um regime contínuo de descarte

por 25 dias (ao invés das sessões de perfuração em bateladas ao longo do tempo planejado para a perfuração do poço) e o descarte sem a distinção das fases sem e com riser (que redistribui o volume concentrado da fase inicial descartado pontualmente por uma área maior que a esperada para sua localização).

Considerando todo o período de descarte, os resultados mostraram espessuras máximas variando de 209,7 a 282,4 cm. Ressalta-se que todos os cenários simulados apresentaram uma condição estável considerando o ângulo máximo em que um material granular é empilhado antes de desmoronar. As áreas de deposição variaram de 0,69 km² a 1,08 km² considerando o limiar de 0,01 mm; para espessuras iguais ou superiores a 1,0 mm as áreas de deposição são significativamente inferiores, variando de 0,21 km² a 0,27 km².

A área de abrangência total potencialmente impactada pelo material descartado pela atividade, considerando a integração de todos os cenários simulados para espessuras iguais ou superiores a 0,01 mm, é de 3,56 km². No entanto, considerando o limiar de 1,0 mm, a área potencialmente impactada pelo material descartado é de 0,92 km². A distância linear máxima entre o ponto de descarte e o limite de alcance da dispersão do cascalho até a espessura de 0,01 mm foi 1,89 km. Considerando o limite até a espessura de 1 mm, a distância máxima foi de 0,49 km.

Uma vez que o modelo DREAM é determinístico para avaliações de cascalhos e fluidos de perfuração, assumindo que os períodos selecionados para as simulações podem não ter abrangido toda a variabilidade das condições oceanográficas, a avaliação de impactos ambientais pode ser realizada considerando-se um raio, medido a partir da maior distância alcançada com relação ao poço de perfuração para espessuras superiores a 0,01 mm e para espessuras acima de 1,00 mm. A Tabela 13 apresenta os raios medidos para cada uma das condições estudadas.



Tabela 13 - Resumo dos raios medidos dos poços de perfuração até a maior distância alcançada para espessuras superiores a 0,01 mm e 1,00 mm.

POÇO	DIREÇÃO	CLASSIFICAÇÃO	Raio \geq 0,01 mm (km)	Raio \geq 1 mm (km)	Raio \geq 10 mm (km)
BAR-M-346	ESE	Menor Intensidade	0,81	0,48	0,20
		Maior Intensidade	1,89	0,79	0,42
	WNW	Menor Intensidade	1,05	0,61	0,29
		Maior Intensidade	1,21	0,61	0,32

A partir desta tabela é possível observar que os maiores raios medidos ocorreram para os cenários de maior intensidade (1,89 km para espessuras superiores a 0,01 mm e 0,79 km para espessuras superiores a 1,00 mm e 0,42 km para espessuras superiores a 10 mm nos cenários de ESE) e os menores raios ocorreram para os cenários de menor intensidade (0,81 km para espessuras superiores a 0,01 mm e 0,48 km para espessuras superiores a 1,00 mm e 0,20 km para espessuras superiores a 10 mm nos cenários de ESE).

Adicionalmente, neste relatório, são apresentados os resultados de concentrações na coluna d'água dos fluidos de perfuração ao longo de todo o período simulado (todas as fases de perfuração, com e sem *riser*). Os resultados mostram que as plumas de fluidos de perfuração estão localizadas ao longo de toda a coluna d'água, já que os descartes com *riser* são realizados em superfície. As maiores concentrações foram de 168,9 mg/L para o cenário de ESE- menos intenso. Este cenário apresentou também a menor área de abrangência, sendo de 0,37 km². Em todos os demais cenários, as concentrações foram de 112 mg/L.

Vale ressaltar que as altas concentrações localizam-se próximas ao ponto de descarte e sua permanência na coluna d'água está limitada ao período do próprio descarte. Além disso, em distâncias de 700 m do ponto de descarte os valores de concentração são pouco significativos (atingem o limite de 5 mg/L).

5. BIBLIOGRAFIA

BRANDSMA, M. & SMITH, J. 1999. Offshore Operators Committee Mud and Produced Water Discharge Model – Report and User Guide – Exxon Production Research Company.

HENRIK, R.; REED, M.; DURGUT, I. & DITLEVSEN, M.K., 2006. The use of the diagenetic equations to predict impact on sediment due to discharges of drill cuttings and muds. In: 9th IMEMS Proceedings. October, 2006. CD-ROM. p. 4-25 of drilling discharges section.

KJEILEN-EILERTSEN, G.; TRANNUM, H.; JAK, R. G.; SMIT, M. G. D.; NEFF, J. & DURELL, G. 2004. Literature report on burial: derivation of PNEC as component in the MEMW model tool. In: ERMS Report no. 9B.

SMIT, M. G. D.; HOLTHAUS, K. I. E.; KAAG, N. B. H. M.; JAK, R. G., 2006. The derivation of a PNEC-water for weighting agents in drilling mud. EMRS Report n° 6.

TETRA TECH, 2015a. Modelagem Hidrodinâmica para a Bacia de Barreirinhas, região do Bloco BAR-M-346. Relatório Técnico, Revisão 00 (04 de dezembro de 2015). 106pp+Anexo.

TETRA TECH, 2015b. Modelagem de Derrame de Óleo para o Bloco BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas. Relatório Técnico, Revisão 02 (04 de dezembro de 2015). 125pp+Anexos.

WATSON, R.L., 1969. Modified Ruber's Law Accurately Predicts Sediment Settling Velocities. *Water Resources Research*. 5(5): p. 1147-1150.



6. EQUIPE TÉCNICA

Profissional	Ana Carolina R. Lammardo
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Oceanógrafa / Ma. Oceanografia Geológica
Registro no Conselho de Classe	1.689 (AOCEANO)
CPF	216.695.528-29
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Eduardo Yassuda
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Engenheiro Mecânico / Me. Oceanografia Física / Dr. Engenharia Oceânica
Registro no Conselho de Classe	060.184.738.5 (CREA-SP)
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	94066
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Gabriel Clauzet
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Físico / Me. Oceanografia Física / Dr. Oceanografia Física
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
CPF	188.764.658-20
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Glauco Matheus Lopes
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Oceanógrafo / Me. Sistemas Costeiros e Oceânicos
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
CPF	320.456.728-16
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Mariana Lino Gouvêa
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Meteorologista / Me. Meteorologia
Registro no Conselho de Classe	5069291950 (CREA-SP)
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	5489811
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	Item 2.1.3 e Anexo C
Assinatura	_____

Profissional	Ricardo O. Busoli
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Oceanógrafo / Me. Oceanografia Biológica
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
CPF	184.317.508-80
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Tito Conte
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Oceanógrafo
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
CPF	391.812.538-69
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	Anexo C
Assinatura	_____



ANEXO A – DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS DREAM

Os processos físico-químicos que regem o modelo DREAM são calculados separadamente para cada componente do efluente. Os principais componentes do sistema DREAM são um modelo de campo próximo (Plume3D) e um modelo de trajetória em três dimensões (REED & HETLAND, 2002; RYE *et al.*, 2006; JOHANSEN & DURGUT, 2006).

A.1 Equações Governantes

A formulação numérica do modelo de campo próximo (Plume3D) é baseada nas formulações de Koh & Chang (1973). Em relação à dispersão passiva, emprega-se um método lagrangiano descrito em Reed & Hetland (2002).

O movimento de uma pluma é regido por equações de conservação de massa e volume, *momentum*, flutuabilidade e partículas sólidas, sal e entalpia. O termo pluma refere-se ao material descartado na coluna d'água, sob ação dos regimes de jato, colapso dinâmico, ou dispersão passiva.

Nas **fases dinâmicas (jato e colapso dinâmico)**, as variações dessas quantidades ocorrem ao longo do eixo no qual a pluma se direciona (centro de massa da pluma). Sendo, portanto, as taxas de mudanças descritas como derivadas em relação a esse eixo.

As equações de conservação que governam o movimento são:

Massa:

$$\frac{d}{ds}(\rho Q) = E\rho_a - \sum_i S_i\rho_i \quad (1)$$

onde Q é a vazão, ρ a densidade do efluente, ρ_a é a densidade do ambiente, ds é a variação do comprimento do eixo, E o entranhamento, ρ_i é a densidade do i -ésimo constituinte ao longo do eixo do jato e S_i a taxa de variação de volume deste elemento.

Momentum (Quantidade de Movimento):

A taxa de variação da quantidade de movimento ao longo do eixo do jato é representada pelo fluxo de fluabilidade mais o entranhamento de quantidade de movimento do ambiente, menos o somatório da taxa de quantidade de movimento de cada constituinte que passa pelo jato, mais a força de arrasto:

$$\frac{d}{ds}(\rho QU) = \pi b^2 g(\rho - \rho_a)J + E\rho_a U_a - \sum_i (S_i \rho_i U) + F_D \quad (2)$$

Sendo g a aceleração da gravidade, J é o vetor unitário na direção vertical, U_a é a velocidade das correntes ambientais, F_D é a força de arrasto e b é o raio do jato.

Flutuabilidade:

Representada pela taxa de entranhamento do fluido ambiente devido ao empuxo menos o somatório das taxas de saída de constituintes do jato:

$$\frac{d}{ds}(Q(\rho_a(0) - \rho)) = E(\rho_a(0) - \rho_a) - \sum_i S_i(\rho_a(0) - \rho_i) \quad (3)$$

Partículas Sólidas:

$$\frac{dP_i}{ds} = -S_i \quad (4)$$

Temperatura:

$$\frac{d}{ds}(Q(T_d - T_a)) = E(T_d - T_a) \quad (5)$$

T_d e T_a sendo a temperatura do efluente e do ambiente, respectivamente.

**Salinidade:**

$$\frac{d}{ds}(Q(S_d - S_a)) = E(S_d - S_a) \quad (6)$$

S_d e S_a sendo a salinidade do efluente e do ambiente, respectivamente.

Fluxo do Volume:

$$Q = \pi b^2 |\vec{U}| \quad (7)$$

b sendo o raio da seção transversal da pluma e U a velocidade da pluma.

Como já citado, uma vez terminada a fase dinâmica da pluma tem início a fase de dispersão passiva. O esquema de dispersão utilizado nesta etapa é um modelo lagrangiano, descrito em Reed & Hetland (2002). Segundo os autores, o modelo DREAM é baseado na equação geral de transporte:

$$\frac{\delta C_i}{\delta t} + \vec{V} \times \vec{\nabla} C_i = \vec{\nabla} \times D_k \vec{\nabla} C_i + \sum_{j=1}^n r_j C_i + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n r_{ji} C_i \quad (8)$$

onde C_i é a concentração do i^o componente químico liberado; t é o tempo; \vec{V} é o vetor de transporte advectivo; $\vec{\nabla}$ é o operador gradiente; e D_k é o coeficiente de dispersão turbulenta em $k =$ direções x, y e z . Os termos r_j representam as variações dos processos físico-químicos. $\nabla \nabla$

Os termos referentes à degradação, r_{ij} , controlam a degradação de subprodutos, como a transferência de massa de um componente para outro. Desta forma, as mudanças nas propriedades toxicológicas permanecem retidas no modelo.

Concentrações dos componentes do fluido na coluna d'água são calculadas a partir da distribuição de pseudopartículas Lagrangianas no tempo e espaço. Cada partícula matemática representa, conceitualmente, uma nuvem Gaussiana de componentes dissolvidos, gotículas, ou partículas em decantação. Os campos de concentração são constituídos a partir da superposição de todas essas nuvens. Cada nuvem consiste de um elipsoide com uma partícula em seu centro, e semieixos definidos como uma função de tempo da partícula. A distribuição teórica da massa dentro do elipsoide é Gaussiana,

com seus desvios padrões nas direções x , y e z (CSANADY, 1973 *apud* REED & HETLAND, 2002):

$$\sigma_i = \sqrt{2k_i t} \quad (9)$$

$$C = \frac{m}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-z_0)^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (10)$$

onde x , y , z são as coordenadas do ponto de interesse; x_0 , y_0 , z_0 são as coordenadas do centro de massa da nuvem; são as variâncias e m a massa.

Cada um desses elipsóides geralmente contribui em massa para muitas células no campo de concentração; e elipsóides vizinhos geralmente se sobrepõem espacialmente. Então, uma determinada célula do campo de concentração contém uma concentração resultante da presença de múltiplas nuvens de partículas próximas. Esse esquema remove grande parte da dependência do campo de concentração calculado sobre o número de partículas e a resolução da grade.

Os processos físico-químicos que regem o comportamento do efluente são:

Advecção e Dispersão

A advecção é calculada a partir da sobreposição de uma velocidade média local a uma componente turbulenta escolhida aleatoriamente. Geralmente, essa velocidade média local é a soma das componentes climatológicas, de maré e geradas pelos ventos e ondas (Stokes). Essas componentes especificadas são então interpoladas e somadas à componente turbulenta. A partir desse somatório, é calculada a advecção na coluna d'água. A componente turbulenta (w') é expressa como:

$$w' = \sqrt{6k / \Delta t} \quad (11)$$

onde k é o coeficiente de dispersão turbulenta estimado para as direções horizontais e verticais.



O coeficiente de dispersão horizontal pode ser aproximado a partir de dados obtidos em estudos de dispersão de corantes, como os de Okubo (1971, 1974 *apud* REED & HETLAND, 2002) e revisados posteriormente por Bowden (1983 *apud* REED & HETLAND, 2002):

$$K_x = 0,0027t^{1,34} \quad (12)$$

para K em cm^2/s e t em segundos.

O coeficiente de difusão turbulenta vertical acima da pycnoclina é relacionado às condições de onda, segundo Ichiye (1967 *apud* REED & HETLAND, 2002):

$$K_z = 0,0028 \frac{H^2}{T} \exp(-2kz) \quad (13)$$

sendo H a altura da onda, T o período de onda e k o número da onda.

Abaixo da profundidade da pycnoclina, K_z é assumido como uma constante de valor $10\text{-}4 \text{ m}^2/\text{s}$ (KULLENBERG, 1982 *apud* REED & HETLAND, 2002). Na ausência da pycnoclina, a equação de Ichiye é aplicada da superfície ao fundo.

O deslocamento vertical das partículas é calculado a partir da sobreposição de uma velocidade turbulenta aleatória a uma velocidade ascendente (ou descendente). As velocidades verticais diferenciais são calculadas usando a média harmônica de dois extremos, uma vez que o coeficiente de arrasto é uma função do número de Reynolds (JOHANSEN, 2000 *apud* REED & HETLAND, 2002):

$$w_{rise} = 1/(w_1^{-1} + w_2^{-1}), \text{ solução combinada} \quad (14)$$

$$w_1 = d^2 g' / 18\nu, \text{ (para número de Reynolds } < 1000) \quad (15)$$

$$w_2 = \sqrt{3d |g'|}, \text{ (para número de Reynolds } < 1000) \quad (16)$$

Onde,

$g' = g(\rho_\alpha - \rho_0) / \rho_\alpha$, g é a aceleração gravitacional e ν a viscosidade cinemática da água ($\sim 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

Dissolução

A dissolução é dependente da fração molar de cada componente presente no efluente. A concentração ambiental também é um fator importante, principalmente próximo ao local de descarte/vazamento. A equação que governa a dissolução do componente i é:

$$dm_i / dt = K_d A (F_i S_i - C_i) \quad (17)$$

onde, K_d é o coeficiente de transferência de massa por dissolução, em m/s; A a área superficial do efluente, em m²; F_i a fração molar do componente i remanescente no efluente; S_i a solubilidade do componente i , em g/m³, ppm; e C_i a concentração ambiente do componente i , em g/m³.

Adsorção

A adsorção desempenha um papel importante no transporte e destino dos poluentes no ambiente aquático. Ela determina a extensão do particionamento de um poluente entre a fase de particulado em suspensão e a fase dissolvida, modulando, desta forma, os efeitos tóxicos e a taxa de remoção da coluna d'água para os sedimentos.

Velocidade de Queda das Partículas

Assume-se que as velocidades de deposição das partículas são constituídas por duas contribuições no modelo (RYE *et al.*, 2006). A primeira contribuição é a velocidade laminar de afundamento de Stokes para partículas menores:

$$W_1 = \frac{d^2 g'}{18\nu} \quad (18)$$



onde,

W_1 = velocidade laminar de afundamento de Stokes de uma partícula

d = diâmetro da partícula

g' = gravidade reduzida = $g (\rho_{particula} - \rho_{\acute{a}gua}) / \rho_{\acute{a}gua}$

g = gravidade padrão

ρ = densidade da partícula ou da água do mar

ν = viscosidade cinemática = $1.358 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ à 10°C para a água do mar

De forma simplificada, o coeficiente de viscosidade cinética ν é mantido constante com a temperatura (influência negligenciável nos resultados).

A segunda contribuição para a deposição das partículas é a velocidade de deposição dominada pela fricção (isto é, intervalo dominado pelo coeficiente de arrasto constante).

$$W_2 = K\sqrt{dg'} \quad (19)$$

onde,

W_2 = velocidade de deposição dominada pela fricção

K = constante empírica adimensional = 1.054

A velocidade total de deposição W é, desta forma, estimada pela combinação de duas velocidades:

$$W = \frac{1}{\frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2}} \quad (20)$$

A constante empírica K é escolhida de forma que a correspondência é alcançada entre a velocidade de deposição dominada pela fricção, conforme determinado pela USACE (1984) e a fórmula acima. A fórmula leva em consideração que os grãos geralmente são não-esféricos e de forma geral, possuem velocidades de deposição menores do que os grãos com forma esférica.

Pág.	Modelagem do Descarte de Cascalho e Fluidos de Perfuração para o Bloco BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas	
A-8/8		

A.2 BIBLIOGRAFIA

REED, M.; HETLAND, B. 2002. DREAM: a Dose-Related Exposure Assessment Model Technical Description of Physical-Chemical Fate Components. In: SPE International Conference On Health, Safety And Environment In Oil And Gas Exploration And Production. Kuala Lumpur, Malaysia. 2002.

RYE, H.; REED, M.; DURGUT, I.; DITLEVSEN, M.K. 2006. Documentation report for the revised DREAM model. In: **ERMS Report** nº.18.

JOHANSEN, Ø.; DURGUT, I. 2006. Implementation of the near-field module in the ERMS model. In: ERMS Report, v.77, n.23.

KOH, R.C.Y. & CHANG, Y.C., 1973. 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.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1984. Shore Protection Manual. Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi. 2 vols.

Revisão 00 03/2016	Tt 16-007	<hr/> Técnico Responsável	
-----------------------	-----------	---------------------------	---

ANEXO B – DESCRIÇÃO DOS DADOS DO WOA13

Os dados de temperatura e salinidade utilizados na modelagem de diluição e dispersão de efluentes foram obtidos no Atlas Eletrônico de dados do WOA13¹². Este Atlas é composto por diversos conjuntos de dados conceituados que são disponibilizados pela comunidade científica, e deram origem a diversas descobertas sobre os parâmetros físicos da água do mar em oceano aberto.

Estes dados, referentes a diversas expedições oceanográficas, são compilados pelo NODC da NOAA¹³ e então interpolados com uma resolução horizontal de 1/4° em sua versão mais recente. A partir destes campos interpolados foram extraídos os valores de coluna d'água para as coordenadas de descarte.

Como esse conjunto de dados é adquirido, e analisado, em diferentes épocas, localizações geográficas, analistas e equipamentos, a qualidade dos dados é verificada através de uma série de procedimentos distintos. Estes procedimentos de análise, filtragem e interpolação foram realizados, pelo NODC (LOCARNINI *et al.*, 2013; ZWENG *et al.*, 2013), segundo a metodologia a seguir:

1. O primeiro passo se dá pela verificação de duplicidade geográfica, temporal ou sequencial dos dados. Este tipo de erro indica falha por parte do fornecedor ou por parte do dispositivo de armazenamento de dados do equipamento de coleta;
2. O segundo passo busca a verificação de possíveis erros durante as coletas, nas quais distúrbios elétricos internos do equipamento ou erros de leitura do operador resultam em gradientes acentuados e/ou incoerentes ao resto dos dados. Para o controle de variações abruptas é realizada uma análise de consistência em que as variabilidades superiores ou inferiores a 0,1% da ocorrência possível (assumindo uma distribuição normal de frequência nos dados), são removidas deste conjunto. Este intervalo é alterado para 1% quando se considera regiões com maior variabilidade, tais como profundidades inferiores a 50 m ou dominadas pela dinâmica costeira;

¹² *World Ocean Atlas 2013*. Disponível em: <<http://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/>>.

¹³ *National Oceanographic Data Center (NODC) do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) dos Estados Unidos.*

Pág.	Modelagem do Descarte de Cascalho e Fluidos de Perfuração para o Bloco BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas	
B-2/2		

3. O terceiro passo verifica a estabilidade da coluna d'água quanto à variação do gradiente de densidade. O dado é descartado no caso de uma ocorrência superior a dois fragmentos do perfil que apresentem variações de densidade em que uma parcela superior do fluido seja 30% mais densa que a inferior;
4. O próximo passo consiste na correção da informação de batitermógrafos proposta por Hanawa *et al.* (1994);
5. O último passo consiste na interpolação espacial das informações resultantes. Este procedimento de interpolação consiste na distribuição dos dados em uma grade pré-estabelecida de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, onde as médias climatológicas de cada mês são calculadas e aplicadas no centro do elemento desta grade e interpoladas espacialmente. Esta interpolação é ponderada de acordo com a proximidade com o centro do ponto de grade, garantindo assim, a relação com a proximidade do ponto. A partir deste ponto é realizada uma análise para garantir o preenchimento de todos os pontos desta grade (DALEY, 1991).

B.1 BIBLIOGRAFIA

DALEY, R., 1991. Atmospheric Data Analysis. Cambridge University Press, Cambridge, 457pp.

HANAWA, K.; RAUL, P.; BAILEY, R.; SY, A. & SZABADOS, M., 1994. Calculation of new depth equations for expendable bathythermographs using a temperature-error-free method (application to Sippican/TSK T-7, T-6 and T-4 XBTs). IOC Technical Series, 42, 46pp.

LOCARNINI, R.A.; MISHONOV, A.V.; ANTONOV, J.I.; BOYER, T.P.; GARCIA, H.E.; BARANOVA, O.K.; ZWENG, M.M.; PAVER, C.R.; REAGAN, J.R.; JOHNSON, D.R.; HAMILTON, M. & SEIDOV, D., 2013. World Ocean Atlas 2013, Volume 1: Temperature. Levitus, S. (Ed.) & Mishonov, A. (Technical Ed.); NOAA Atlas NESDIS 73, 40pp. Disponível em: <http://data.nodc.noaa.gov/woa/WOA13/DOC/woa13_vol1.pdf>. Acesso em: 06 out. 2014.

Revisão 00 03/2016	Tt 16-007	<hr/> Técnico Responsável	
-----------------------	-----------	---------------------------	---



ANEXO C – ANÁLISE DAS CORRENTES PARA DETERMINAÇÃO DOS PERÍODOS DE SIMULAÇÃO

Considerando que as condições de deposição de sólidos descartados estão diretamente ligadas às características do transporte hidrodinâmico, foram determinados períodos representativos de quatro condições de deposição na região do Bloco BAR-M-346, para máximas e mínimas intensidades nas direções predominantes das correntes. O critério para a determinação dos períodos de simulação, bem como o resultado das análises, serão apresentados a seguir.

Para este estudo foram utilizados dados de correntes do modelo Delft3D aplicado pela TETRA TECH, correspondentes ao período de 01 de janeiro de 2014 a 01 de abril de 2015. Foi utilizado um ponto de análise, selecionados com base na dinâmica na região do poço simulado, conforme apresentado na Tabela C-1.

A análise realizada foi baseada na velocidade zonal e meridional (componentes X e Y do movimento) para as profundidades de 7,5 m, 62,5 m, 275 m, 625 m, 875 m e 2.500 m, correspondentes às camadas do modelo hidrodinâmico na modelagem de cascalho de forma a representarem as 4 principais situações hidrodinâmicas da região: Corrente Norte do Brasil com forte influência do vento (7,5 m); circulação dominada pela Corrente Norte do Brasil (62,5 m e 275 m); cisalhamento da entre a Corrente Norte do Brasil e a Corrente de Contorno Oeste Profunda (625 m) e a Corrente de Contorno Oeste Profunda que está presente na maior parte da coluna d'água (875 m e 2500 m) (TETRA TECH,2016).

Tabela C-1 - Localização dos pontos de análise.

NOME DO PONTO	POÇOS	LATITUDE	LONGITUDE
P1	BAR-M-346	01° 59' 12,246" S	041° 43' 50.466" W

No intuito de determinar os períodos representativos de maior e menor transporte de sólidos descartados e, conseqüentemente, menor ou maior acumulação do material, respectivamente, buscou-se analisar os resultados do modelo hidrodinâmico supracitado a fim de avaliar os períodos representativos das condições hidrodinâmicas propícias a estes tipos de deposição, considerando as direções predominantes.

A determinação de tais condições baseia-se na análise do fluxo resultante integrado na coluna d'água, para considerar o transporte ao longo da trajetória vertical da partícula. Após a integração da corrente na coluna d'água, rotaciona-se as componentes zonal e meridional da corrente para o ângulo da direção predominante (direção mais frequente da corrente), considerando intervalos de 22,5° e, portanto, um total de 16 direções. Em seguida, aplica-se a média móvel ponderada com o intervalo de dias referentes à operação e tempo de deposição das partículas (duração das simulações estimada no Subitem 2.1.6).

Esta análise permite estimar o deslocamento resultante das partículas durante o percurso descendente da coluna, e a atuação de correntes com direções distintas que atuariam sobre a partícula como está exemplificado na Figura C, considerando neste caso um fluxo de direção preferencial norte-sul.

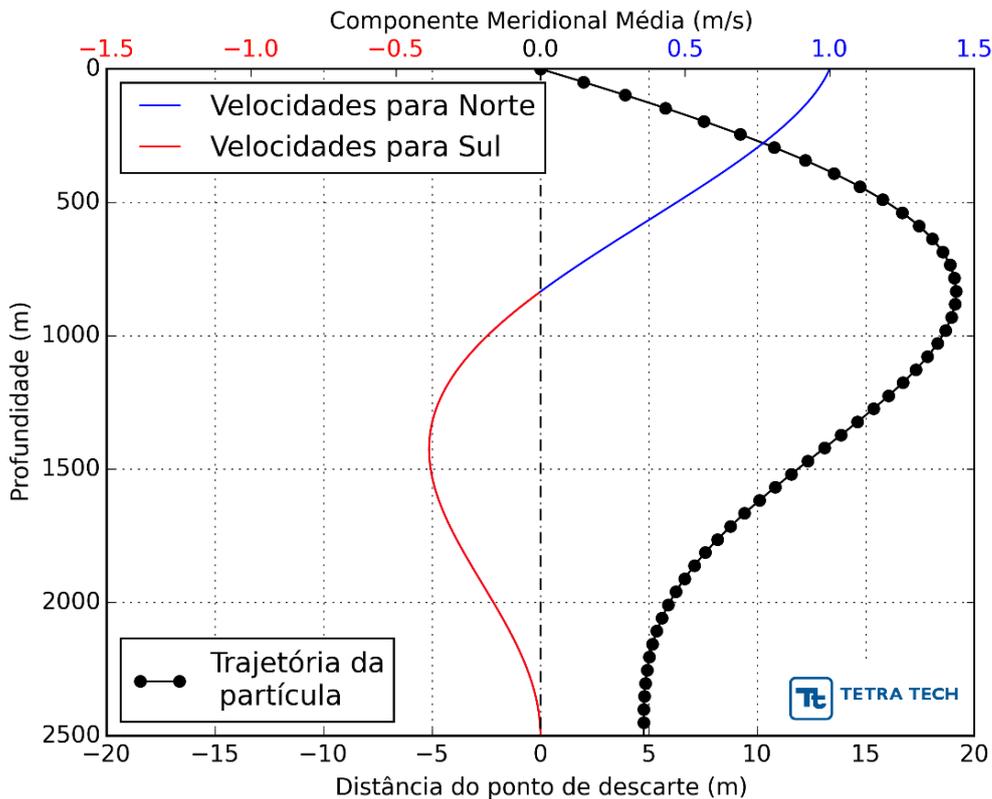
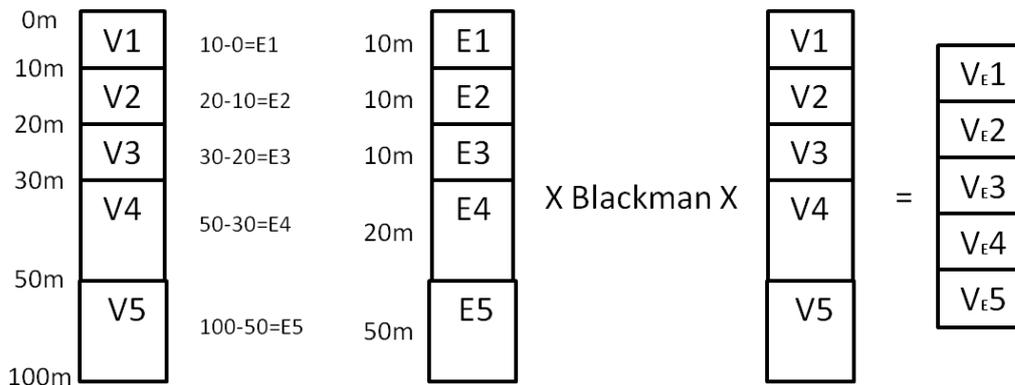


Figura C1- Esquema de deslocamento da partícula de acordo com o perfil vertical médio de corrente. A linha preta com pontos representa a trajetória da partícula em queda livre que sofreu atuação do campo de correntes apresentado (a título de exemplo este campo é estacionário). As linhas vermelhas e azuis representam as intensidades das correntes para sul e para norte, respectivamente.

O cálculo da corrente integrada na coluna d'água é baseado na média ponderada, de acordo com a profundidade, de cada uma das componentes da velocidade rotacionada para cada passo de tempo. A análise de médias ponderadas ao longo da coluna d'água permite que o fluxo resultante considere o espaçamento vertical irregular entre as camadas do Delft3D. Em termos de espessuras, esta metodologia permite que o resultado da corrente média sofra um menor efeito das correntes quando as camadas são menos espessas (neste caso as camadas superficiais), do que quando as camadas são mais espessas (neste caso as camadas mais profundas). Ou seja, para o caso do ponto aqui analisado, as duas últimas camadas são mais relevantes na ponderação por apresentarem espessuras muito maiores.

Dinamicamente isso significa que a Corrente Norte do Brasil (CNB) exerce menor influência na deposição do que a Contra Corrente Oeste Profunda (CCOP), que é mais espessa, uma vez que o deslocamento da partícula não depende apenas da intensidade da corrente, mas também do tempo de influência desta que é proporcional a espessura das camadas. A influência vertical das correntes mencionadas é observada nas seções verticais apresentadas no item de oceanografia do Diagnóstico do Meio Físico.

Após a determinação da corrente resultante na coluna d'água, aplica-se então a média móvel ponderada centrada com janela de *Blackman* (BLACKMAN & TURKEY, 1959), de extensão correspondente à duração da simulação, de 25 dias. Desta forma a média móvel privilegia o valor centrado e os vizinhos em relação à totalidade da janela, causando poucos efeitos sobre o valor central da série. A forma na qual a metodologia é calculada é apresentada no esquema da Figura C2.

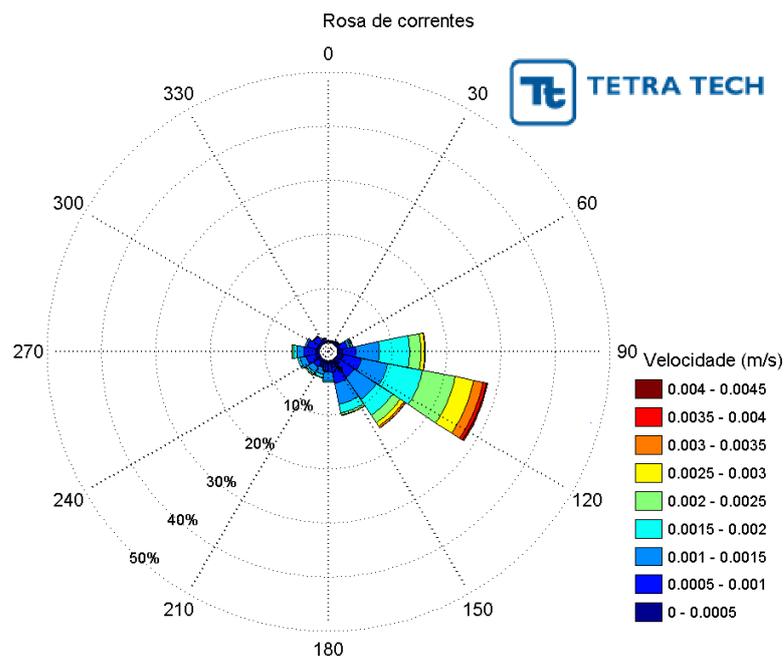


$$\frac{V_{e1} + V_{e2} + V_{e3} + V_{e4} + V_{e5}}{(E1+E2+E3+E4+E5) \times 5} = V_{med}$$



Figura C2 - Esquema do cálculo de médias ponderadas com filtro Blackman para a componente meridional da velocidade. Os blocos iniciados com V referem-se à velocidade da camada, E refere-se à espessura da camada e V_E refere-se à velocidade multiplicada pela espessura. Desta forma, dividindo-se cada V_E pela soma das espessuras, temos o peso da média ponderada de cada velocidade.

A direção predominante das correntes mostrou-se para ESE no ponto P1, conforme apresentado respectivamente na Figura C3. Desta forma, a rotação dos eixos resultou na componente zonal rotacionada para ESE. Portanto, os resultados apresentados a seguir serão referentes a esta direção. A circulação sobre o ponto de análise é dominada pela CNB e CCOP, estas correntes apresentam direções opostas (WNW e ESE, respectivamente). Este resultado mostra que a CCOP terá mais influência do que a CNB sobre o transporte total da coluna d'água.



Direção em graus a partir do norte geográfico, velocidade média de 0.0013826 m/s

Figura C3 - Rosa direcional da corrente média na coluna d'água no ponto P1, segundo a metodologia apresentada, a partir dos dados do modelo Delft3D em todo o período analisado.

Os períodos selecionados para a simulação são apresentados na Tabela C2. Na Figura C4 são apresentadas as séries temporais das intensidades da componente meridional de toda a coluna d'água rotacionada para a direção predominante. As linhas azuis representam as direções para WNW e NW enquanto as linhas vermelhas representam as direções para ESE e SE. Observa-se a predominância de direções para ESE (corroborando o observado na rosa direcional da Figura C3), e também que as velocidades mais intensas estão relacionadas a estas direções.

Tabela C2 - Períodos de simulação referentes aos fluxos integrados mais e menos intensos.

Ponto	Direção	Classificação	Data e hora inicial	Data e hora final
P1	WNW	Menor intensidade	09-Dez-2014 02:00	23-Jan-2015 02:00
		Maior intensidade	24-Jan-2014 03:00	10-Mar-2014 03:00
	ESE	Menor intensidade	19-Ago-2014 06:00	03-Out-2014 06:00
		Maior intensidade	22-Nov-2014 08:00	06-Jan-2015 08:00

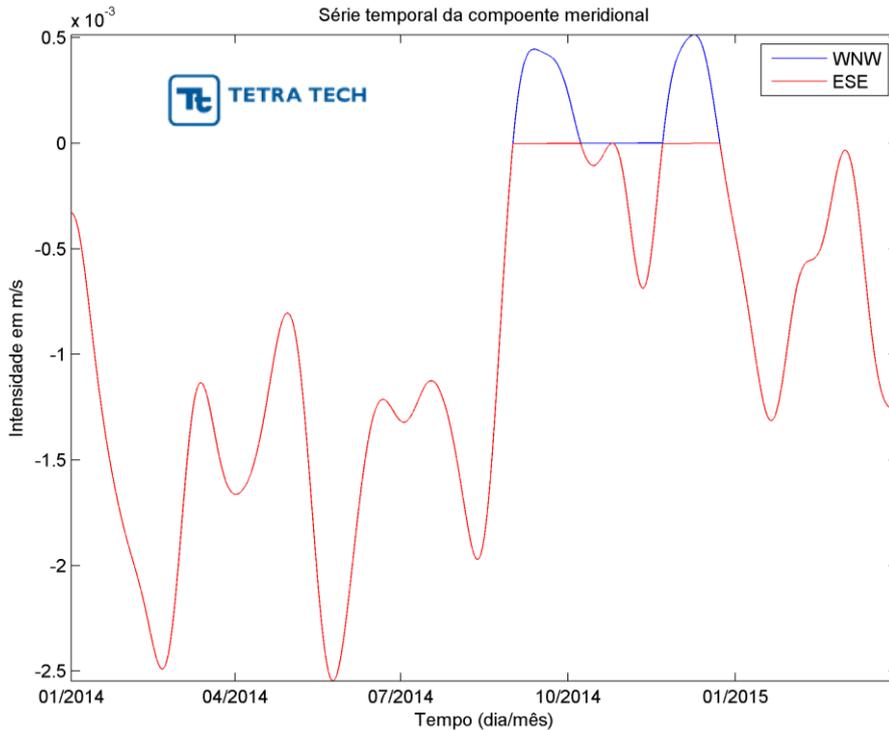


Figura C4 - Série temporal da corrente média na coluna d'água para o ponto P1. As linhas vermelhas referem-se à corrente para ESE e as linhas azuis referem-se à corrente para WNW.

A fim de caracterizar os períodos selecionados, são apresentados os perfis verticais da corrente em formato *stick plot*, com três profundidades representativas de superfície, meio e fundo: 7,5 m, 625 m e 2.000 m, respectivamente. Os *stick plots* são apresentados da Figura C5 a C8, representando os períodos selecionados para o ponto P1, nas condições de mínima e máxima intensidade para WNW e para ENE.

Para as máximas intensidades no ponto P1 para a direção WNW (Figura C5) as correntes superficiais apresentaram direção predominante para sudoeste, devido à circulação da CNB. Já as correntes intermediárias apresentam padrão variando de WSW para WNW ao longo do tempo, enquanto a camada profunda apresenta padrão para SSE associado à CCOP (conforme o Diagnóstico do Meio Físico).

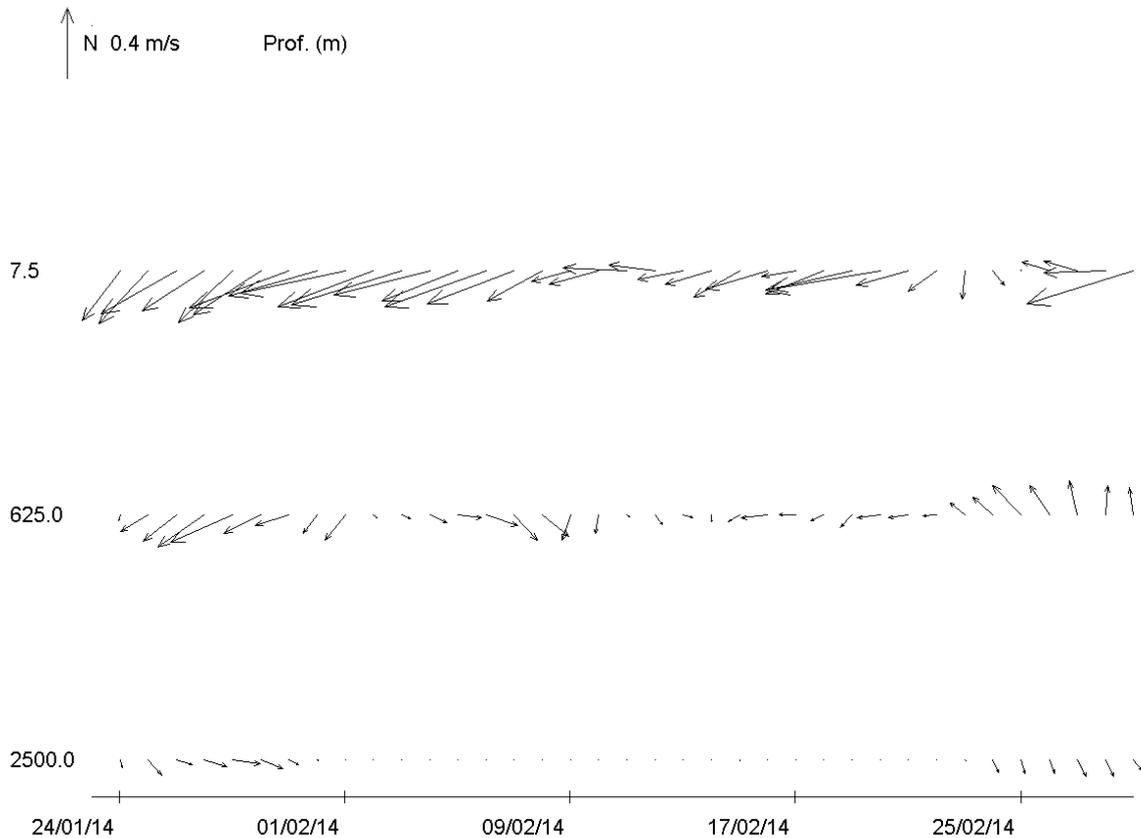


Figura C5 - Stickplot do perfil das correntes no ponto P1 para o período de intensidade máxima para a direção WNW, segundo dados do modelo Delft3D.

Quanto às intensidades mínimas do ponto P1 para a direção WNW (Figura C6), as correntes apresentam padrão de direção semelhante, de maneira geral, ao período de máximas intensidades nesta mesma direção, diferenciando-se pelo sinal de fenômenos de meso-escala na superfície, tal como a passagem de vórtices. Desta forma, há uma maior variabilidade da direção na camada superficial em comparação com o período anterior, resultando em um fluxo menos intenso do que o apresentado anteriormente.

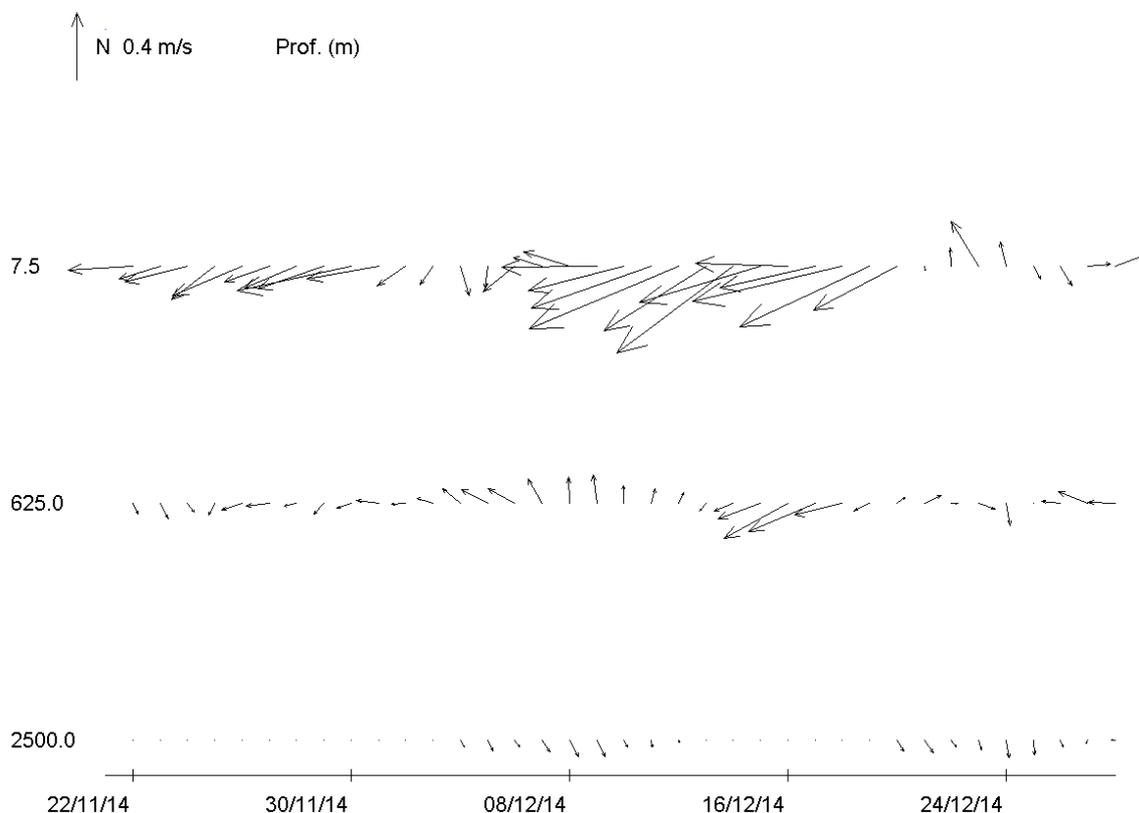


Figura C6 - Stickplot do perfil das correntes no ponto P1 para o período de intensidade mínima para a direção WNW, segundo dados do modelo Delft3D.

Para a direção predominante no ponto P1 (ESE), o período de intensidade máxima (Figura C7) apresenta um padrão de correntes de superfície semelhante ao supracitado, com alta variabilidade de direções associado à fenômenos em meso-escala. A corrente de meia água apresenta certa variabilidade de direções, e a corrente de fundo encontra-se mais intensa do que nos dois períodos referentes à direção WNW. Este fato resulta em um fluxo médio mais intenso.

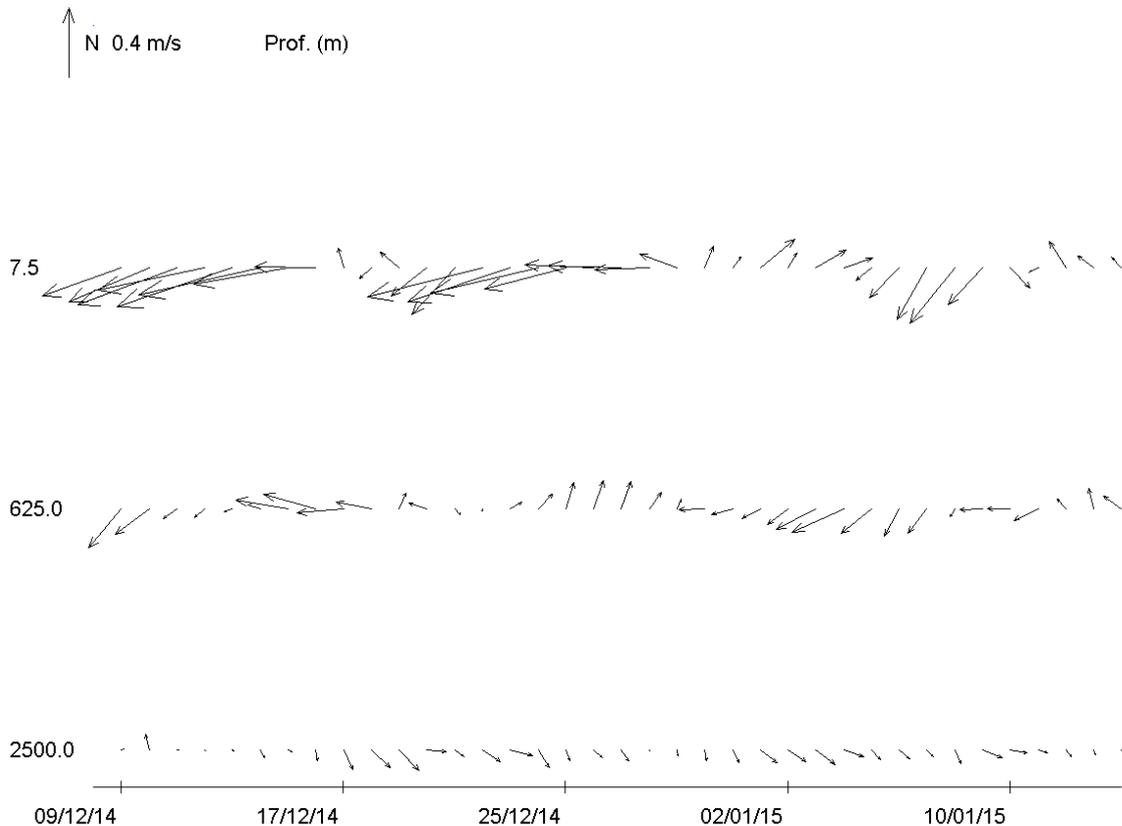


Figura C7 - Stickplot do perfil das correntes no ponto P1 para o período de intensidade máxima para a direção ESE, segundo dados do modelo Delft3D.

O padrão das correntes no período de intensidade mínima para a direção ESE no ponto P1 (Figura C8) diferencia-se do período de condição de máxima intensidade, pois tanto as correntes superficiais quanto as de fundo apresentam menor variabilidade nas direções. O resultado do transporte para esta direção resulta das direções contrárias na superfície e no fundo, caracterizando o fluxo médio no período como menos intenso.

Desta forma, para o ponto P1 a condição de transporte das partículas é dominada pela intensidade da contra-corrente de fundo, em vista de dois fatores: a menor variabilidade na direção e a espessura das camadas mais profundas. O padrão de superfície neste ponto, associado à Corrente Norte do Brasil e a fenômenos de meso-escala exercem menor influência sobre o transporte local.

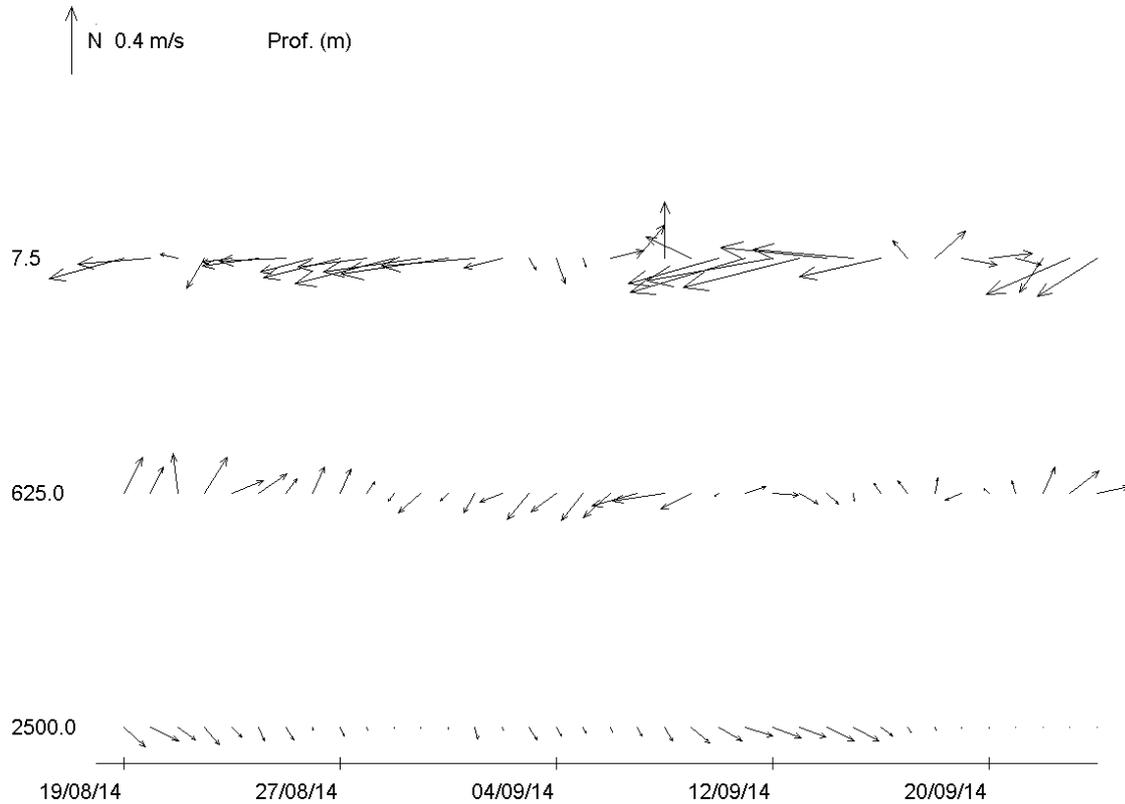


Figura C8 - Stickplot do perfil das correntes no ponto P1 para o período de intensidade mínima para a direção ESE, segundo dados do modelo Delft3D.

C.1 BIBLIOGRAFIA

BLACKMAN, R. B. AND TUKEY, J. W. 1959. "Particular Pairs of Windows" in the Measurement of Power Spectra, From the Point of View of Communications Engineering. New York: Dover, pp. 98-99.