



Relatório Técnico [rev.01]

## Modelagem de Cascalho e Fluido Aderido

Bloco ES-M-598 | Bacia do Espírito Santo

---

Preparado para: Statoil

Preparado por: Ana Boechat

Luiza Ribeiro

Henery Garção

Marcelo Cabral

Natalia Gomes

30 de outubro de 2015

### **Prooceano**

Av. Rio Branco, 311/1205 – Centro

CEP 20.040-009 – Rio de Janeiro – RJ

Tel./Fax + 55 21 2532.5666

[www.prooceano.com.br](http://www.prooceano.com.br)

## Controle de revisão

---

### Revisão nº 01

Data: 30/10/2015

Descrição: Inserção de texto nos itens 1 e 1.1 e remoção da tabela 18.

Responsável: Natalia Gomes

Empresa: Prooceano

---

### Revisão nº 02

Data: / /

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

---

### Revisão nº 03

Data: / /

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

---

### Revisão nº 04

Data: / /

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

---

### Revisão nº 05

Data: / /

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

---

## Sumário

---

<b>1. Introdução .....</b>	<b>11</b>
1.1. Descrição da Atividade .....	11
<b>2. Metodologia.....</b>	<b>14</b>
2.1. Modelo Hidrodinâmico .....	14
2.2. Modelo de Dispersão .....	18
2.3. Estratégias de Modelagem .....	26
2.4. Forçantes .....	40
<b>3. Resultados .....</b>	<b>52</b>
3.1. Resultados Probabilísticos.....	54
3.2. Resultados Determinísticos .....	61
<b>4. Conclusão .....</b>	<b>78</b>
<b>5. Bibliografia.....</b>	<b>80</b>

## Índice das imagens

Figura 1: Localização do ponto de descarte (poço 598-B), inserido no Bloco ES-M-598, Bacia do Espírito Santo ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000).....	12
Figura 2: Seção meridional do HYCOM na longitude de 25° W, na porção leste do Atlântico Norte no dia 15 de janeiro de 2002. Área sombreada: densidade. Linhas finas: interfaces das camadas. Linha grossa: profundidade da camada de mistura. Fonte: <a href="http://www.hycom.org/hycom/overview">http://www.hycom.org/hycom/overview</a> . Acessado em Setembro de 2015. ....	15
Figura 3: Seção meridional do HYCOM na longitude de 25° W, na porção leste do Atlântico Norte no dia 15 de julho de 2002. Área sombreada: densidade. Linhas finas: interfaces das camadas. Linha grossa: profundidade da camada de mistura. Fonte: <a href="http://www.hycom.org/hycom/overview">http://www.hycom.org/hycom/overview</a> . Acessado em Setembro de 2015. ....	15
Figura 4: Representação esquemática das três fases descritas pelo efluente. Modificado de Brandsma & Smith (1999).....	18
Figura 5: Exemplo comportamento das partículas na seção transversal vertical no campo próximo de uma pluma submersa calculada com o DREAM.....	20
Figura 6: Representação esquemática do cálculo da probabilidade de presença do constituinte a partir de $n$ casos determinísticos. ....	35
Figura 7: Número de simulações realizadas por período do ano. Cada barra colorida reflete uma simulação distinta com duração de 24 dias (tempo total de simulação). Em laranja, são apresentadas as simulações determinísticas realizadas para o verão (janeiro a junho) e, em azul, as realizadas para o inverno (julho a dezembro). ....	37
Figura 8: Domínios das grades utilizadas na modelagem para a pilha de deposição (em azul); e para a pluma de sólidos em suspensão (em verde) ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). ....	40
Figura 9: Localização do ponto de grade do HYCOM mais próximo ao local de descarte.....	41
Figura 10: Histogramas direcionais de corrente nas profundidades de 0, 100, 500 e 1.500 metros, para o período representativo do cenário de verão (janeiro a junho), do ponto de grade do HYCOM mais próximo ao poço 598-B.....	42
Figura 11: Histogramas direcionais de corrente nas profundidades de 0, 100, 500 e 1.500 metros, para o período representativo do cenário de inverno (julho a dezembro), do ponto de grade do HYCOM mais próximo ao poço 598-B.....	43
Figura 12: Localização do ponto de grade do NODC mais próximo ao local de descarte. ....	45

Figura 13: Perfis de temperatura, salinidade e densidade para o ponto do NODC mais próximo ao poço 598-B.....	46
Figura 14: Localização do ponto de grade do NCEP mais próximo ao poço 598-B.....	50
Figura 15: Histogramas direcionais para os ventos de cada cenário sazonal escolhido.....	51
Figura 16: Fluxograma de apresentação dos resultados.....	53
Figura 17: Mapa de probabilidade de presença dos sólidos depositados com espessuras superiores a 0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm, considerando todos os resultados determinísticos, no cenário de verão ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). ....	55
Figura 18: Mapa de probabilidade de presença de deposição dos sólidos de espessuras superiores a 0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm, considerando todos os resultados determinísticos no cenário de inverno ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000).....	57
Figura 19: Mapa de espessura máxima de sólidos depositados no fundo oceânico considerando todos os casos determinísticos de verão ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). ....	58
Figura 20: Mapa de espessura máxima de sólidos depositados no fundo oceânico considerando todos os casos determinísticos de inverno ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). ....	60
Figura 21: Histogramas direcionais de corrente nas profundidades de 0, 100, 500 e 1.500 metros, para o período representativo do cenário determinístico de espessura máxima, do ponto de grade do HYCOM mais próximo ao poço 598-B.....	63
Figura 22: Histogramas direcionais de corrente nas profundidades de 0, 100, 500 e 1.500 metros, para o período representativo do cenário determinístico de distância máxima, do ponto de grade do HYCOM mais próximo ao poço 598-B.....	64
Figura 23: Pilha resultante da integração das seções sem <i>riser</i> e com <i>riser</i> . Caso determinístico – espessura máxima ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). ....	65
Figura 24: Pilha resultante da integração de todas as seções. Caso determinístico – espessura máxima ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000).....	65
Figura 25: Pilha resultante da integração das seções sem <i>riser</i> e com <i>riser</i> . Caso determinístico – distância máxima ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000).....	67
Figura 26: Pilha resultante da integração de todas as seções. Caso determinístico – distância máxima ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000).....	67
Figura 27: Concentração máxima de sólidos na coluna d'água considerando todo o período de simulação e todos os descartes: visão em planta (painel superior) e em perfil com	

---

orientação NW-SE (painel inferior). Caso determinístico – espessura máxima ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). .....	69
Figura 28: Concentração máxima de sólidos na coluna d'água considerando todo o período de simulação e todos os descartes: visão em planta (painel superior) e em perfil com orientação SW-NE (painel inferior). Caso determinístico – espessura máxima ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). .....	70
Figura 29: Visão em planta da concentração de sólidos na coluna d'água após 2 dias e 9 horas do início do descarte: visão em planta. Caso determinístico – espessura máxima ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). .....	71
Figura 30: Visão em planta da concentração de sólidos na coluna d'água após 6 dias e 12 horas do início do descarte: visão em planta. Caso determinístico – espessura máxima ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). .....	72
Figura 31: Concentração máxima de sólidos na coluna d'água considerando todo o período de simulação e todos os descartes: visão em planta (painel superior) e em perfil com orientação NW-SE (painel inferior). Caso determinístico – distância máxima ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). .....	74
Figura 32: Visão em planta da concentração de sólidos na coluna d'água após 1 dia e 12 horas do início do descarte: visão em planta. Caso determinístico – distância máxima ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). .....	75
Figura 33: Visão em planta da concentração de sólidos na coluna d'água após 6 dias e 12 horas do início do descarte: visão em planta. Caso determinístico – distância máxima ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). .....	76

## Índice das tabelas

---

Tabela 1: Coordenadas e profundidade aproximada do ponto utilizado para as simulações (Datum SIRGAS 2000). .....	12
Tabela 2: Características principais do projeto de perfuração.....	13
Tabela 3: Densidades para o cascalho e fluido de perfuração e frações dos componentes sólidos e líquidos do fluido.....	13
Tabela 4: Distribuição granulométrica para os descartes de cascalho e fluido de base água. ..	28
Tabela 5: Distribuição granulométrica para os descartes de cascalho e fluido de base sintética. .....	28
Tabela 6: Distribuição granulométrica para os descartes de fluido excedente (base aquosa)...	28
Tabela 7: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de cascalho das seções I a III (seções sem <i>riser</i> ). .....	30
Tabela 8: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de cascalho da seção IV (seções com <i>riser</i> ). .....	31
Tabela 9: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de cascalho das seções V a VII (seções com <i>riser</i> ).....	31
Tabela 10: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de cascalho da seção VIII (seção com <i>riser</i> ).....	31
Tabela 11: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido aderido das seções I a III.....	32
Tabela 12: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido aderido da seção IV.....	32
Tabela 13: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido aderido da seção V.....	32
Tabela 14: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido aderido da seção VI a VIII.....	33
Tabela 15: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido excedente da seção I a III.....	33
Tabela 16: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido excedente da seção IV. ....	33

Tabela 17: Número de simulações determinísticas realizadas para compor cada um dos cenários probabilísticos escolhidos. ....	36
Tabela 18: Intensidades máximas de corrente obtidas para os cenários de verão (janeiro a junho) e inverno (julho a dezembro). ....	44
Tabela 19: Temperatura, salinidade e densidade para o período de verão. ....	47
Tabela 20: Temperatura, salinidade e densidade para o período de inverno. ....	48
Tabela 21: Temperatura do ar característica para cada cenário. ....	51
Tabela 22: Áreas obtidas para as classes de probabilidade de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, considerando os distintos limiares monitorados. Cenário de verão.....	55
Tabela 23: Áreas obtidas para as classes de probabilidade de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, considerando os distintos limiares monitorados. Cenário de inverno.....	57
Tabela 24: Distâncias máximas alcançadas para cada limiar de espessura adotado (0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm). Cenário de verão. ....	59
Tabela 25: Espessuras máximas obtidas a 0, 100, 500 e 1.000 m de distância da fonte. Cenário de verão. ....	59
Tabela 26: Distâncias máximas alcançadas para cada limiar de espessura adotado (0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm). Cenário de inverno. ....	60
Tabela 27: Espessuras máximas obtidas a 0, 100, 500 e 1.000 m de distância da fonte. Cenário de inverno. ....	61
Tabela 28: Data inicial e final da simulação obtidas para os dois casos determinísticos selecionados. ....	62
Tabela 29: Espessura máxima, área e distância máxima da fonte alcançada pelas pilhas de deposição. Caso determinístico – espessura máxima.....	66
Tabela 30: Resumo da área encontrada para cada limiar de espessura adotado (0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm). Caso determinístico – espessura máxima.....	66
Tabela 31: Espessura máxima, área e distância máxima da fonte alcançada pelas pilhas de deposição. Caso determinístico – distância máxima. ....	68
Tabela 32: Resumo da área encontrada para cada limiar de espessura adotado (0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm). Caso determinístico – distância máxima. ....	68
Tabela 33: Concentração máxima, distância máxima da fonte e tempo de permanência para as plumas de sólidos em suspensão. Caso determinístico – espessura máxima.....	72



---

Tabela 34: Distâncias máximas alcançadas para alguns limiares de concentração. Caso determinístico – espessura máxima. ....	73
Tabela 35: Concentração máxima, distância máxima da fonte e tempo de permanência para as plumas de sólidos em suspensão. Caso determinístico – distância máxima. ....	76
Tabela 36: Distâncias máximas alcançadas para alguns limiares de concentração. Caso determinístico – distância máxima. ....	77

## Equipe técnica

---

**Nome: Ana Carolina Rochinha Boechat**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 4961307

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Todas

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

**Nome: Luiza Gomes Ribeiro**

---

Registro no Conselho de Classe:

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 6304193

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Todas

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

**Nome: Henery Ferreira Garção**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 3790998

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Todas

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

**Nome: Marcelo Montenegro Cabral**

---

Registro no Conselho de Classe: 2010110225 - CREA/RJ

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 5621594

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Todas

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

**Nome: Natalia Gomes dos Santos**

---

Registro no Conselho de Classe:

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 4896913

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Todas

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

# 1. Introdução

Neste documento, é apresentado o estudo de modelagem numérica do comportamento físico do cascalho e fluido de perfuração a serem descartados durante as atividades de perfuração nos Blocos ES-M-598, ES-M-671, ES-M-743 e ES-M-673, na Bacia do Espírito Santo. Considerando os projetos de poço-tipo propostos para a atividade, para fins de modelagem matemática, a Statoil considerou, como cenário crítico para o impacto da deposição de fluido e cascalhos, o projeto de poço tipo-1 (pré-sal), cujas volumetrias foram estimadas de forma conservadora. Da mesma forma, foi selecionada a localização do poço 598-B (Bloco ES-M-598), cuja localização é a mais próxima da costa (158 Km do município de Linhares-ES) e em águas mais rasas (1.952 m).

O trabalho é dividido em duas etapas: a primeira consiste na análise das características meteorológicas da região, ou seja, os parâmetros capazes de afetar o comportamento do material descartado, como corrente, temperatura do mar e salinidade, vento e temperatura do ar. E a segunda etapa do trabalho compreende a simulação da dispersão do material, que resulta na formação de pilhas de deposição no assoalho marinho. Essas simulações foram conduzidas em dois modos distintos: o probabilístico e o determinístico.

Para este estudo foram selecionados dois cenários sazonais distintos (verão e inverno). Para a separação destes cenários foi utilizado o mesmo critério utilizado na Modelagem de Óleo e na Modelagem Hidrodinâmica (TETRA TECH, 2015), ou seja, a análise dos dados de vento e corrente. Dessa forma, no presente relatório, o cenário de verão compreende os meses de janeiro a junho e o cenário de inverno, os meses de julho a dezembro.

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/DILIC/IBAMA) para a modelagem de cascalho e fluido.

## 1.1. Descrição da Atividade

Este estudo é referente ao projeto de perfuração do poço 598-B (Figura 1, Tabela 1), localizado no Bloco ES-M-598, Bacia do Espírito Santo. O local de interesse encontra-se em uma lâmina d'água de, aproximadamente, 1.952 m, a 158 Km do município de Linhares-ES.

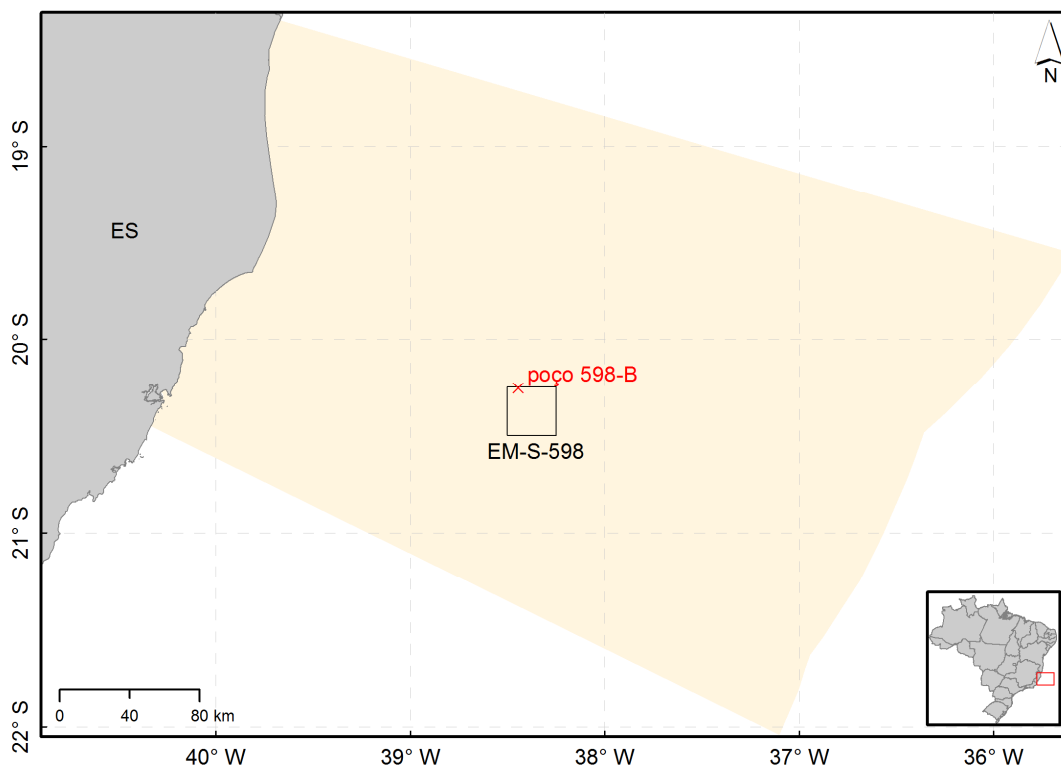


Figura 1: Localização do ponto de descarte (poço 598-B), inserido no Bloco ES-M-598, Bacia do Espírito Santo (*Datum* SIRGAS 2000).

Tabela 1: Coordenadas e profundidade aproximada do ponto utilizado para as simulações (*Datum* SIRGAS 2000).

Identificação	Coordenadas	Profundidade (m)
Poço 598-B	20°15'27,97" S 38°26'37,54" W	1.952

O projeto de poço prevê a perfuração em oito seções, divididas em duas etapas. Na primeira etapa, que enquadra as três primeiras seções, não será utilizado o *riser*, o descarte ocorrerá do fundo e o fluido de perfuração será de base aquosa. Na segunda etapa, que abrange as demais seções, o *riser* será instalado, e o descarte ocorrerá a partir da superfície; haverá a utilização de fluido de base aquosa na seção I a IV e de fluido de base sintética nas demais seções. É previsto também descarte de fluido excedente nas seções I a IV, todos de base aquosa.

As informações a respeito do projeto de perfuração são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Características principais do projeto de perfuração.

<b>Características</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>	<b>VII</b>	<b>VIII</b>
Diâmetro com fator de alargamento (pol)	10,02	43,05	28,56	21,42	18,49	14,28	12,50	8,67
Vol. cascalho descartado (m <sup>3</sup> )	45,0	112,0	334,0	246,0	430,0	76,0	88,0	27,0
Vol. fluido aderido (m <sup>3</sup> )	45,0	112,0	334,0	550,0	30,0	5,0	6,0	2,0
Tempo de descarte (h)	0,75	1,87	5,57	85,69	201,37	59,98	89,97	59,98
Vazão (m <sup>3</sup> /h)	120,0	120,0	120,0	9,3	2,3	1,4	1,0	0,5
Vol. fluido excedente (m <sup>3</sup> )	90,0	224,0	6.000,0	1.110,0	-	-	-	-
Tempo de descarte (h)	0,75	1,87	50,00	9,25	-	-	-	-
Vazão (m <sup>3</sup> /h)	120,0	120,0	120,0	120,0	-	-	-	-
Base do fluido	Água	Água	Água	Água	Sintético	Sintético	Sintético	Sintético
Profundidade de descarte (m)	Fundo	Fundo	Fundo	Superfície	Superfície	Superfície	Superfície	Superfície

Em relação ao cascalho e fluido aderido, o maior volume de material será gerado na seção IV, no entanto, a seção III apresenta um volume bem elevado de fluido a ser descartado ao final da seção (6000 m<sup>3</sup>), sendo este alto volume considerado de forma contingencial, podendo ser necessário para limpeza do poço e preparação para a seção seguinte.

Para as simulações de dispersão do material gerado na atividade de perfuração, além das informações sobre o projeto do poço, são também necessários dados a respeito da composição do cascalho e dos fluidos de perfuração utilizados, como densidade e fração dos componentes sólidos e líquidos dos fluidos (Tabela 3).

Tabela 3: Densidades para o cascalho e fluido de perfuração e frações dos componentes sólidos e líquidos do fluido.

<b>Cascalho</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>	<b>VII</b>	<b>VIII</b>
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	2.600	2.600	2.600	2.300	2.300	2.300	2.300	2.400
<b>Fluido de Perfuração</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>	<b>VII</b>	<b>VIII</b>
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1.300	1.300	1.300	1.170	1.400	1.460	1.560	1.560
Fração dos sólidos no fluido	10%	10%	10%	6%	13%	15%	18%	18%
Dens. dos sólidos no fluido (kg/m <sup>3</sup> )	4.270,0	4.270,0	4.270,0	4.500,0	4.230,8	4.166,7	4.166,7	4.166,7
Fração dos líquidos no fluido	90%	90%	90%	94%	87%	85%	82%	82%
Dens. dos líquidos no fluido (kg/m <sup>3</sup> )	970,0	970,0	970,0	957,4	977,0	982,4	987,8	987,8

## 2. Metodologia

A metodologia seguida neste estudo é apresentada em três etapas. Na primeira etapa, os **modelos numéricos** utilizados no estudo são descritos com base em suas características e equações governantes. A segunda etapa apresenta as **estratégias de modelagem** adotadas e a terceira e última etapa consiste na análise dos **parâmetros meteo-oceanográficos** da região, mais especificamente aqueles capazes de afetar o comportamento do efluente lançado.

### 2.1. Modelo Hidrodinâmico

Neste item é importante ressaltar que foram utilizados resultados obtidos da base de dados do modelo HYCOM, disponíveis para *download* na página do projeto: <http://hycom.org/dataserver/>.

#### 2.1.1. Descrição do Modelo

O **HYCOM** (*HYbrid COordinate Ocean Model*) é um modelo de circulação oceânica global que utiliza discretização horizontal em diferenças finitas (GABIOUX, 2008) e tem como principal característica a utilização de um sistema de coordenadas verticais híbridas. Isto é, utiliza o sistema de coordenadas isopícnais para as áreas de oceano aberto e estratificado, coordenadas *z* (cartesianas) para a camada de mistura e regiões pouco estratificadas, e coordenadas sigma para regiões com menores profundidades e topografia de fundo variável (zonas costeiras). Utilizando esses três sistemas de coordenadas, o modelo pode conservar as características das massas d'água por longos períodos de tempo em regiões oceânicas (coordenada isopícnal), obter alta resolução na camada de mistura ou em regiões com pouca estratificação (coordenada *z*), e resolver melhor a topografia de fundo em áreas costeiras ou sobre a plataforma continental (coordenada sigma). Desta forma, o HYCOM é basicamente um modelo em camadas isopícnais, que pode realizar uma transição suave para os sistemas de coordenadas *z* e sigma próximo aos contornos superiores e inferiores, ou quando a resolução vertical é inadequada (GABIOUX, 2008). Assim, o HYCOM combina as vantagens dos diferentes sistemas de coordenadas, simulando de forma otimizada as características da circulação oceânica e costeira, sendo atribuída ao usuário a determinação das zonas de transição entre os sistemas de coordenadas (CHASSIGNET *et al.*, 2003). A Figura 2 e a Figura 3 ilustram a estrutura híbrida do modelo.

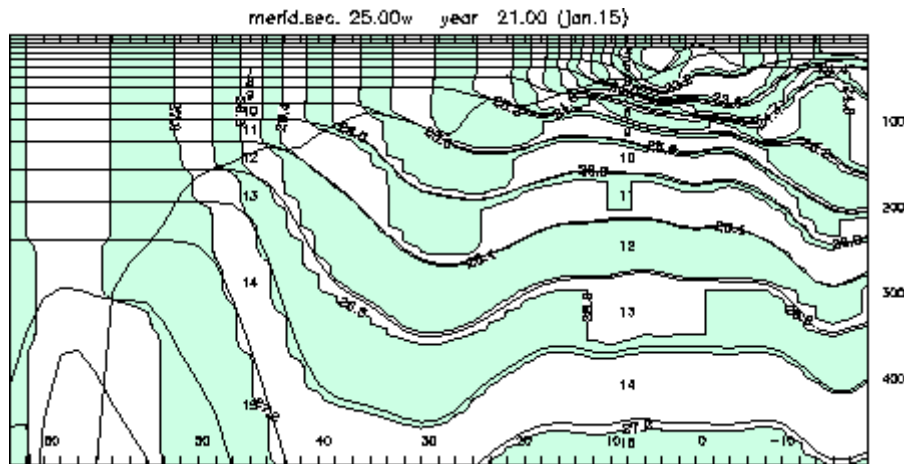


Figura 2: Seção meridional do HYCOM na longitude de 25° W, na porção leste do Atlântico Norte no dia 15 de janeiro de 2002. Área sombreada: densidade. Linhas finas: interfaces das camadas. Linha grossa: profundidade da camada de mistura. Fonte: <http://www.hycom.org/hycom/overview>.

Acessado em Setembro de 2015.

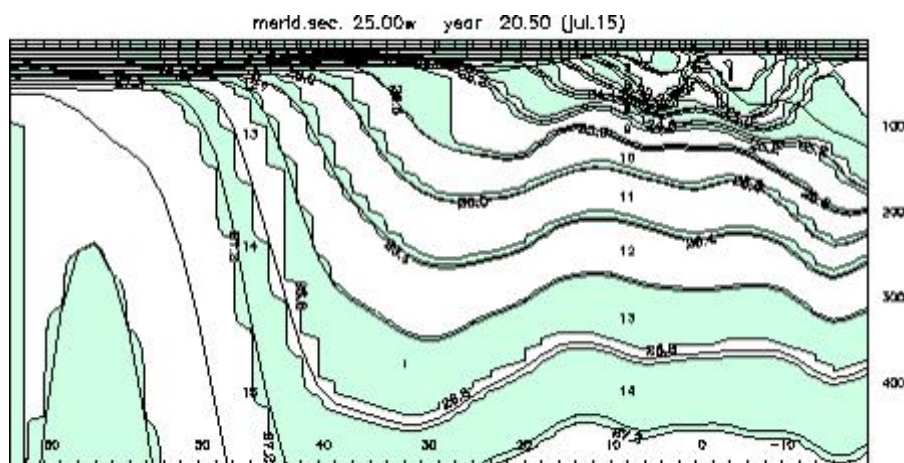


Figura 3: Seção meridional do HYCOM na longitude de 25° W, na porção leste do Atlântico Norte no dia 15 de julho de 2002. Área sombreada: densidade. Linhas finas: interfaces das camadas. Linha grossa: profundidade da camada de mistura. Fonte: <http://www.hycom.org/hycom/overview>.

Acessado em Setembro de 2015.

## 2.1.2. Equações Governantes

O HYCOM é um modelo de equações primitivas contendo 5 equações prognósticas – duas para as componentes horizontais de velocidade, uma equação de continuidade de massa ou tendência de espessura da camada, e duas equações para o par de variáveis termodinâmicas, como temperatura e salinidade ou densidade e salinidade. As equações do modelo podem ser

descritas em coordenadas  $(x, y, s)$ , onde  $s$  é a coordenada vertical não especificada, na forma de (BLECK, 2002):

$$\begin{aligned} \frac{\Delta v}{\Delta t_s} + \nabla_s \frac{v^2}{2} + (\zeta + f)k \times v + \left( \dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right) \frac{\partial v}{\partial p} + \nabla_s M - p \nabla_s \alpha \\ = -g \frac{\partial \tau}{\partial p} + \left( \frac{\partial p}{\partial s} \right)^{-1} \nabla_s \cdot \left( v \frac{\partial p}{\partial s} \nabla_s v \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \left( \frac{\partial p}{\partial s} \right) + \nabla_s \cdot \left( v \frac{\partial p}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left( \dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \left( \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right) + \nabla_s \cdot \left( v \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left( \dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right) = \nabla_s \cdot \left( v \frac{\partial p}{\partial s} \nabla_s \theta \right) + H_\theta \quad (3)$$

onde  $v = (u, v)$  é o vetor velocidade horizontal,  $p$  é a pressão,  $\theta$  representa as variáveis termodinâmicas,  $\alpha$  é o volume específico potencial,  $\zeta$  é a vorticidade relativa,  $M$  é o potencial de Montgomery,  $f$  é o parâmetro de Coriolis,  $k$  é o vetor vertical unitário,  $v$  é o coeficiente variável de viscosidade/difusividade,  $\tau$  é o vetor de estresse de cisalhamento induzido pelo vento ou pelo fundo e  $H_\theta$  representa o somatório dos termos fonte diabáticos, incluindo a mistura diapical, que atua em  $\theta$ . Os subscritos indicam quais variáveis permanecem constantes durante a diferenciação parcial (BLECK, 2002).

Após integração vertical sobre uma camada coordenada, limitada pelas duas superfícies  $S_{sup}$  e  $S_{inf}$  (superfície, fundo do mar e todos os limites de camadas são superfícies  $S$ ), a equação de continuidade (2) se torna equação prognóstica para o peso da camada por unidade de área,  $\Delta p = p_{inf} - p_{sup}$  (BLECK, 2002):

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \Delta p + \nabla_s \cdot (v \Delta p) + \left( \dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right)_{inf} - \left( \dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right)_{sup} = 0 \quad (4)$$

O termo  $\left( \dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right)$  representa o fluxo vertical de massa por uma superfície  $S$ .

A multiplicação de (1) por  $(\partial p / \partial s)$  e integração no intervalo  $(S_{sup}, S_{inf})$ , seguida pela divisão por  $(\Delta p / \Delta s)$ , modifica o termo de estresse de cisalhamento nesta equação para (BLECK, 2002):

$$\frac{g}{\Delta p} (\tau_{sup} - \tau_{inf}) \quad (5)$$

Enquanto o termo de mistura lateral de *momentum* é integrado para:



$$(\Delta p)^{-1} \nabla_s \cdot (v \Delta p \nabla_s v) \quad (6)$$

Estresses induzidos pelo vento e pelo fundo são admitidos como linearmente variáveis sobre determinado intervalo de profundidade, geralmente da ordem de 10 m (BLECK, 2002).

A equação (4) expressa em camadas integradas é da forma de:

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \theta \Delta p + \nabla_s \cdot (v \theta \Delta p) + \left( \dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right)_{\text{inf}} - \left( \dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right)_{\text{sup}} = \nabla_s \cdot (v \Delta p \nabla_s \theta) + H_\theta \quad (7)$$

O sistema de equações prognósticas é complementado por equações diagnósticas, que incluem:

- » A equação hidrostática:  $\partial M / \partial \alpha = p$  ;
- » Uma equação de estado relacionando salinidade, temperatura e pressão à  $\alpha^{-1}$ , e
- » Uma equação descrevendo o fluxo vertical de massa sobre uma superfície  $S$ :  $\dot{s} \partial p / \partial s$

Esta última equação controla o espaçamento e o movimento das interfaces de camadas, sendo a essência da modelagem com coordenadas híbridas (BLECK, 2002).

### 2.1.3. Características da Simulação

Para o estudo foram utilizados os resultados de uma simulação para o oceano global com o HYCOM 2.2 como modelo dinâmico. Nesta simulação, os cálculos foram feitos para uma grade gerada na projeção de Mercator, entre 78°S e 47°N (resolução de 1/12° no equador), com dimensões horizontais de 4.500 (longitude) x 3.298 (latitude) pontos de grade, resultando num espaçamento médio de ~7 km. A grade apresentou, ainda, 32 camadas verticais e uma batimetria derivada da base de dados qualificados NRL DBDB2. As forçantes superficiais foram obtidas do NOGAPS (*Navy Operational Global Atmospheric Prediction System*) e incluíram o cisalhamento e velocidade do vento, fluxo de calor e precipitação.

Nessa simulação, utilizou-se o sistema para assimilação de dados do NCODA (*Navy Coupled Ocean Data Assimilation*), que usa uma modelagem de previsão como partida em um esquema multi-variável de interpolação ótima, que assimila observações de altimetria por satélites (pela trajetória obtida pelo NAVOCEANO *Altimeter Data Fusion Center*), temperatura da superfície do mar (*in situ* e por satélites), assim como perfis de temperatura e salinidade obtidos por XBT's, flutuadores Argo e outras plataformas.

Esse *hindcast*<sup>1</sup> foi conduzido para o período compreendido entre novembro de 2003 até os dias atuais e seus resultados estão disponíveis via OPeNDAP no endereço: <http://www.hycom.org/dataserver>. Os arquivos contêm a saída diagnóstica nos níveis de profundidade da base Levitus para várias variáveis, incluindo: correntes, temperatura e salinidade.

Para as simulações de dispersão de cascalho e fluido aderido apresentadas neste estudo, foram utilizados dados das componentes zonais (u) e meridionais (v) das velocidades de correntes. Os dados foram baixados para o ano de 2010, para o ponto de grade do HYCOM mais próximo ao poço 598-B, como será apresentado no item 2.4.1 (Correntes).

## 2.2. Modelo de Dispersão

O processo dispersivo do efluente, neste caso cascalho + fluido de perfuração, possui três diferentes fases, apresentadas na Figura 4 e detalhadas abaixo.

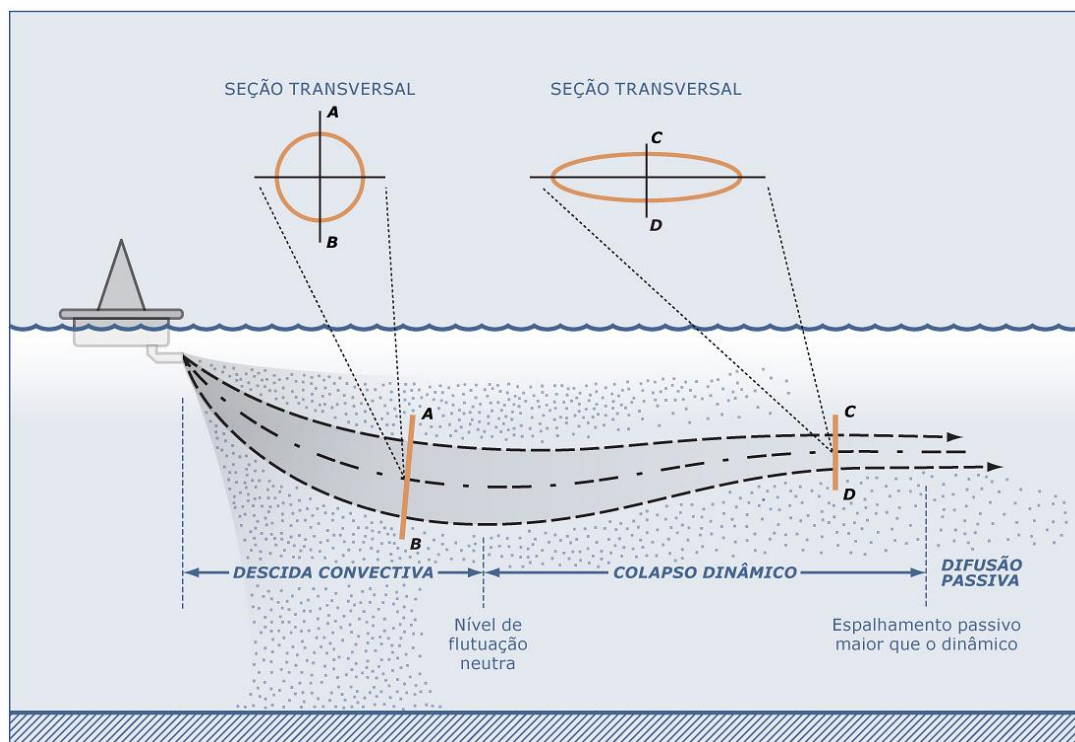


Figura 4: Representação esquemática das três fases descritas pelo efluente. Modificado de Brandsma & Smith (1999).

<sup>1</sup> O termo "*hindcast*" é usado para descrever previsões numéricas realizadas para tempos pretéritos. É uma tentativa de reconstituição das condições ambientais em um determinado período.

A primeira fase, denominada **fase de jato**, corresponde à diluição inicial do efluente, onde as forças de empuxo, quantidade de movimento do efluente e os efeitos dinâmicos das correntes locais, resultam em uma rápida mistura e diluição do efluente no corpo d'água receptor. Esta fase ocorre enquanto o efluente possui movimento próprio, dado pela diferença de densidade com o meio ou pela velocidade de saída da fonte. A fase termina quando o efluente descartado encontra uma superfície horizontal (fundo ou superfície do mar) ou se estabiliza em um nível de flutuação neutra. Finda esta primeira etapa, inicia-se a fase de **colapso dinâmico**, onde o efluente se espalhará na profundidade em que se estabilizou devido, ainda, a sua diferença de densidade em relação ao meio. Esta diferença tende a diminuir com o tempo e, em dado momento, sua contribuição para o espalhamento do efluente será inferior àquela dada pela turbulência do ambiente. Tanto a fase de jato quanto a de colapso dinâmico descrevem a **fase dinâmica, ou campo próximo**.

Ao final da fase de colapso dinâmico, tem início a terceira e última fase, denominada de **dispersão passiva, ou campo afastado**, em que o efluente, a não ser pela velocidade vertical associada a cada constituinte, não possui movimento próprio e segue apenas a dinâmica local. Partículas minerais, como cascalho e materiais pesados, podem se desprender da pluma dependendo da velocidade de deposição e da taxa de entranhamento da água na pluma.

### 2.2.1. Descrição do Modelo

O modelo computacional escolhido para esse estudo foi o **DREAM/ParTrack**, desenvolvido pela SINTEF. O DREAM (Dose-Related Exposure Assessment Model) é um modelo de partículas lagrangianas tridimensional desenvolvido para avaliação das consequências de descartes de diversos tipos de efluente no ambiente marinho, tanto na coluna d'água quanto no leito oceânico.

O modelo **ParTrack** é um submodelo do DREAM adequado para simulação de descartes de cascalho e fluidos de perfuração e avaliação dos efeitos desses descartes no leito oceânico. O **DREAM/ParTrack** possui um modelo de campo próximo com acoplamento dinâmico com um modelo tridimensional de partículas que permite a representação de substâncias na superfície da água, dissolvidas na coluna d'água, em gotículas ou partículas sólidas dispersas na coluna d'água.

As descargas de cascalho e fluido de perfuração têm densidades mais altas do que a água do mar, por isso, um modelo de campo próximo é incluído na modelagem para representação do movimento descendente da pluma. O domínio do modelo de campo próximo está limitado pela região onde a densidade da pluma se iguala com a densidade do ambiente. A partir desse

ponto, os processos de transporte e mistura passam a ser governados por um modelo de campo afastado.

O modelo de campo próximo é governado pelas correntes oceânicas e pelas variações verticais de salinidade e temperatura (estratificação). A combinação desses fatores fará com que a pluma se estabilize em uma determinada profundidade. As partículas minerais (cascalhos, sólidos dos fluidos de perfuração) podem sair da pluma dependendo de suas velocidades de sedimentação e da taxa de entranhamento da água na pluma. Os detalhes mais específicos do modelo de campo próximo podem ser encontrados em Johansen (2000, 2006).

A Figura 5 ilustra o comportamento das partículas na seção transversal vertical no campo próximo de uma pluma submersa calculada com o DREAM para um descarte a, aproximadamente, 5 metros de profundidade.

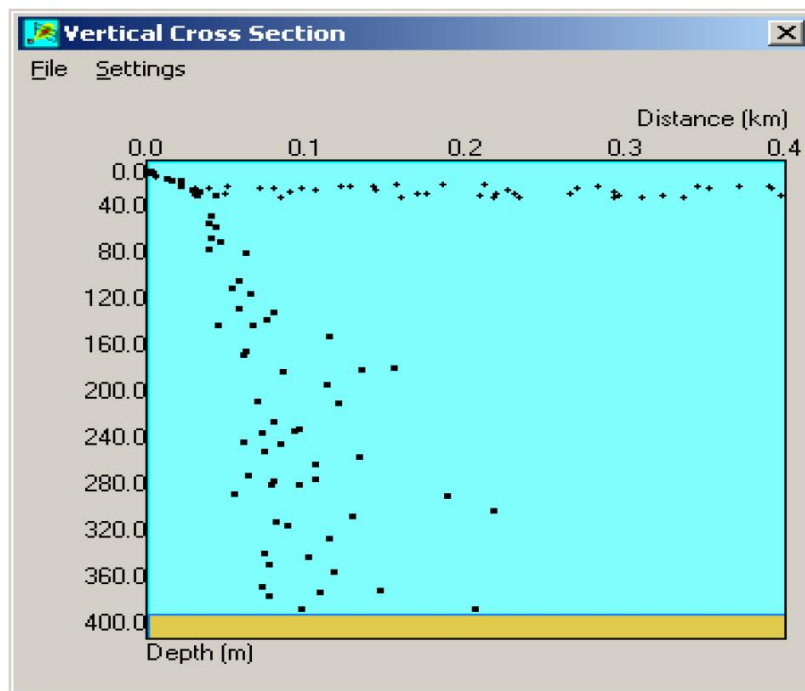


Figura 5: Exemplo comportamento das partículas na seção transversal vertical no campo próximo de uma pluma submersa calculada com o DREAM.

Observe que a profundidade de aprisionamento da pluma é, em torno de, 20 m de profundidade. Nesta profundidade, a pluma submersa se separa em duas partes: uma parte se espalha horizontalmente na profundidade de aprisionamento e a outra afunda mais rapidamente em direção ao fundo do oceano. A primeira parte consiste nos componentes que estão dissolvidos na pluma ou nas partículas sólidas que têm velocidades de sedimentação desprezíveis, e a segunda parte consiste dos materiais mais grosseiros, como, por exemplo, cascalhos ou partículas sólidas de maiores dimensões.

No item a seguir são apresentadas as equações governantes no modelo.

## 2.2.2. 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:**

$$\frac{d}{ds}(\rho Q) = E\rho_a - \sum_i S_i \rho_i \quad (8)$$

onde  $Q$  é a vazão,  $\rho$  a densidade do efluente,  $\rho_a$  é a densidade do ambiente,  $ds$  é a variação do comprimento do eixo,  $E$  o entranhamento,  $\rho_i$  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 flutuabilidade 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:

$$\frac{d}{ds}(\rho QU) = \pi b^2 g(\rho - \rho_a)J + E\rho_a U_a - \sum_i (S_i \rho_i U) + F_D \quad (9)$$

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:

$$\frac{d}{ds}(Q(\rho_a(0) - \rho)) = E(\rho_a(0) - \rho_a) - \sum_i S_i(\rho_a(0) - \rho_i) \quad (10)$$

**Partículas sólidas:**

$$\frac{dP_i}{ds} = -S_i \quad (11)$$

**Temperatura:**

$$\frac{d}{ds}(Q(T_d - T_a)) = E(T_d - T_a) \quad (12)$$

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

**Salinidade:**

$$\frac{d}{ds}(Q(S_d - S_a)) = E(S_d - S_a) \quad (13)$$

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

**Fluxo de volume:**

$$Q = \pi b^2 |\vec{U}| \quad (14)$$

$b$  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:

$$\frac{\delta C_i}{\delta t} + \vec{V} \times \vec{\nabla} C_i = \vec{\nabla} \times D_k \vec{\nabla} C_i + \sum_{j=1}^n r_j C_i + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n r_{ji} C_i \quad (15)$$

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.

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):

$$\sigma_i = \sqrt{2k_i t} \quad (16)$$

$$C = \frac{m}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-z_0)^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (17)$$

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;  $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$  são as variâncias e  $m$  a massa.

Cada um desses elipsoides geralmente contribui em massa para muitas células no campo de concentração; e elipsoides 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:

$$w' = R\sqrt{6k / \Delta t} \quad (18)$$

onde  $R$  é um número randômico que varia de -1 a 1 e  $k$  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):

$$K_x = 0,0027t^{1,34} \quad (19)$$

para  $K$  em  $\text{cm}^2/\text{s}$  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):

$$K_z = 0,0028 \frac{H^2}{T} \exp(-2kz) \quad (20)$$



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  $10^{-4}$  m/s<sup>2</sup> (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):

$$w_{rise} = 1/(w_1^{-1} + w_2^{-1}), \text{ solução combinada} \quad (21)$$

$$w_1 = d^2 g' / 18\nu, \text{ (para número de Reynolds} < 1000), \text{ e} \quad (22)$$

$$w_2 = \sqrt{3d |g'|}, \text{ (para número de Reynolds} > 1000) \quad (23)$$

Onde:

$g' = g(\rho_\alpha - \rho_0) / \rho_\alpha$ ,  $g$  é a aceleração gravitacional e  $\nu$  a viscosidade cinemática da água ( $\sim 1 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/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:

$$dm_i / dt = K_d A (F_i S_i - C_i) \quad (24)$$

onde,  $K_d$  é o coeficiente de transferência de massa por dissolução, em m/s;  $A$  a área superficial do efluente, em m<sup>2</sup>;  $F_i$  a fração molar do componente  $i$  remanescente no efluente;  $S_i$  a solubilidade do componente  $i$ , em g/m<sup>3</sup>, ppm; e  $C_i$  a concentração ambiente do componente  $i$ , em g/m<sup>3</sup>.

## 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.

## 2.3. Estratégias de Modelagem

No modelo DREAM são necessários os seguintes parâmetros para a caracterização do descarte:

- » Duração do descarte;
- » Extensão da seção;
- » Vazão;
- » Diâmetro da fonte;
- » Profundidade de descarte;
- » Angulação da fonte;
- » Inclinação vertical da fonte;
- » Densidade e massa do cascalho;
- » Densidade e massa dos componentes sólidos e líquidos do fluido aderido;
- » Massa total do fluido aderido.

### 2.3.1. Distribuição Granulométrica dos Sólidos

A distribuição granulométrica dos sólidos é intrínseca ao local, sendo dependente das condições da perfuração, características geológicas e formulação dos fluidos utilizados (BRANDSMA & SMITH, 1999). Na ausência de dados específicos para a locação do poço 598-B, recorreu-se a distribuições granulométricas amplamente utilizadas pela comunidade científica, como as sugeridas por Brandsma & Smith (1999).

Segundo os autores, essas distribuições foram obtidas a partir de experimentos e publicações no meio científico (e.g. DAMES & MOORE, 1978; O'REILLY *et al.*, 1989; BRANDSMA, 1993), o que as confere um alto grau de confiabilidade, tendo sido empregadas, inclusive, no MAPEM

(Monitoramento Ambiental em Atividades de Perfuração Exploratória Marítima), projeto desenvolvido por iniciativa dos Centros de Pesquisa das Universidades Federais do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, em parceria com a indústria brasileira de óleo e gás, representada pelo IBP (TOLDO & AYUP-ZOUAIN, 2004).

Dependendo da base do fluido, aquosa ou sintética, há mudança, também, na sua distribuição granulométrica, uma vez que os componentes sólidos presentes nas bases aquosas são mais finos quando comparados aos componentes sólidos de bases não aquosas. A seguir, são especificadas as distribuições granulométricas utilizadas no estudo para o cascalho e sólidos do fluido aderido (Tabela 4 e Tabela 5) e para o fluido excedente (Tabela 6).

Tabela 4: Distribuição granulométrica para os descartes de cascalho e fluido de base água.

Classe	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Fração (%)
1	1.067 – 3.603	24%
2	635 – 1.067	19%
3	232 – 635	20%
4	117 – 232	12%
5	45 – 117	3%
6	14 – 45	6%
7	4 – 14	8%
8	1 – 4	8%

Tabela 5: Distribuição granulométrica para os descartes de cascalho e fluido de base sintética.

Classe	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Fração (%)
1	23.561 – 33.942	16%
2	19.094 – 23.561	17%
3	15.098 – 19.094	17%
4	12.599 – 15.098	16%
5	10.309 – 12.599	13%
6	8.529 – 10.309	9%
7	6.923 – 8.529	6%
8	5.490 – 6.923	3%
9	4.229 – 5.490	2%
10	3.846 – 4.229	1%

Tabela 6: Distribuição granulométrica para os descartes de fluido excedente (base aquosa).

Classe	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Fração (%)
1	43 - 84	3%
2	22 - 43	12%
3	19 - 22	20%
4	17 - 19	17%
5	16 - 17	14%
6	13 - 16	12%
7	9 - 13	8%
8	6 - 9	7%
9	4 - 6	7%

### 2.3.2. Velocidade e Tempo de Queda dos Sólidos

No modelo DREAM, as velocidades de deposição das partículas são divididas em dois regimes: o regime de Stokes e o regime do arrasto constante (RYE *et al.*, 2008). As velocidades de

deposição dentro do regime de Stokes, para partículas de menor tamanho, são dadas pela seguinte equação:

$$W_1 = \frac{d^2 g'}{18\nu} \quad (25)$$

$$g' = g(\rho_{partícula} - \rho_{água}) / \rho_{água} \quad (26)$$

onde  $W_1$  é a velocidade laminar de afundamento de Stokes para uma partícula;  $d$  é o diâmetro da partícula;  $g'$  é a gravidade reduzida, expressa pela equação (26);  $g$  é a gravidade padrão;  $\rho$  é a densidade da partícula ou da água do mar;  $\nu$  é a viscosidade cinemática ( $1,358 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , em uma água com  $10^\circ\text{C}$ ).

A segunda contribuição para a deposição das partículas é o regime de arrasto constante com fricção dominante, para partículas maiores. Uma expressão geral para essa velocidade de queda pode ser derivada a partir do balanço entre as forças de flutuação e de arrasto que atuam na partícula (HU & KINTNER, 1955 *apud* RYE *et al.*, 2008), calculada da seguinte forma:

$$W_2 = \sqrt{\frac{4dg'}{3C_D}} \quad (27)$$

O coeficiente de arrasto  $C_D$ , nesta equação, é uma função do Número de Reynolds ( $Re = W_2 d / \nu$ ). Dessa forma, dois regimes assintóticos são identificados, o regime de Stokes e o regime de arrasto constante.

» Regime de Stokes ( $Re < 1$ ):

$$W_1 = \frac{d^2 g'}{18\nu} \quad (28)$$

» Regime de arrasto constante ( $Re > 1000$ ):

$$W_2 = K\sqrt{4dg'} \quad (29)$$

onde  $K$  é uma constante empírica adimensional. Para valores intermediários do Número de Reynolds ( $1 < Re < 1000$ ), uma equação de interpolação para a velocidade de deposição total  $W$  da partícula pode ser utilizada, da seguinte forma:

$$W = \frac{I}{\left( \frac{I}{W_1} + \frac{I}{W_2} \right)} \quad (30)$$

A constante empírica  $K$  é escolhida de forma que a correspondência seja alcançada entre a velocidade de deposição dominada pela fricção. Essa equação considera as partículas como não esféricas e, portanto, com velocidades de deposição menor que as partículas esféricas.

Para fluidos de base água, assume-se que a maior parte dos produtos químicos existentes é dissolvida na coluna d'água. Para outros tipos de fluido (base óleo e sintética), a dissolução dos produtos químicos na coluna d'água ocorre mais lentamente.

Conhecendo a profundidade na qual o efluente será descartado e a velocidade de queda de cada partícula, é possível avaliar o tempo de chegada das partículas ao assoalho oceânico. Essa estimativa, em uma aproximação linear, pode ser realizada pela divisão da camada a ser percorrida pela velocidade de queda de cada classe de grão.

O cálculo da velocidade e tempo de deposição das partículas foi realizado para o cascalho (Tabela 7 a Tabela 10), para os sólidos do fluido aderido (Tabela 11 a Tabela 14) e para o fluido excedente (Tabela 15 e Tabela 16). As densidades aqui especificadas são referentes somente aos compostos sólidos, tendo sido especificadas na Tabela 3. Para as seções sem *riser*, o descarte foi considerado a 2 m acima do fundo.

Tabela 7: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de cascalho das seções I a III (seções sem *riser*).

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. de deposição (m/s)	Tempo de deposição (h)	Tempo de deposição (dias)
1	2.600	2,65E-01	2,10E-03	< 1
2	2.600	1,27E-01	4,39E-03	< 1
3	2.600	6,03E-02	9,22E-03	< 1
4	2.600	1,65E-02	3,37E-02	< 1
5	2.600	4,84E-03	1,15E-01	< 1
6	2.600	6,84E-04	8,12E-01	< 1
7	2.600	6,53E-05	8,51E+00	< 1
8	2.600	5,24E-06	1,06E+02	4,42

Tabela 8: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de cascalho da seção IV (seções com riser).

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. de deposição (m/s)	Tempo de deposição (h)	Tempo de deposição (dias)
1	2.300	2,37E-01	2,29E+00	< 1
2	2.300	1,10E-01	4,90E+00	< 1
3	2.300	5,16E-02	1,05E+01	< 1
4	2.300	1,36E-02	3,98E+01	1,66
5	2.300	3,92E-03	1,38E+02	5,76
6	2.300	5,54E-04	9,78E+02	40,75
7	2.300	5,29E-05	1,02E+04	426,95
8	2.300	4,24E-06	1,28E+05	5324,29

Tabela 9: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de cascalho das seções V a VII (seções com riser).

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. de deposição (m/s)	Tempo de deposição (h)	Tempo de deposição (dias)
1	2.300	9,43E-01	5,74E-01	< 1
2	2.300	8,15E-01	6,65E-01	< 1
3	2.300	7,29E-01	7,43E-01	< 1
4	2.300	6,57E-01	8,25E-01	< 1
5	2.300	5,97E-01	9,07E-01	< 1
6	2.300	5,42E-01	1,00E+00	< 1
7	2.300	4,90E-01	1,10E+00	< 1
8	2.300	4,39E-01	1,23E+00	< 1
9	2.300	3,89E-01	1,39E+00	< 1
10	2.300	3,55E-01	1,53E+00	< 1

Tabela 10: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de cascalho da seção VIII (seção com riser).

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. de deposição (m/s)	Tempo de deposição (h)	Tempo de deposição (dias)
1	2.400	9,80E-01	5,53E-01	< 1
2	2.400	8,46E-01	6,40E-01	< 1
3	2.400	7,57E-01	7,15E-01	< 1
4	2.400	6,82E-01	7,94E-01	< 1
5	2.400	6,20E-01	8,74E-01	< 1
6	2.400	5,62E-01	9,63E-01	< 1
7	2.400	5,09E-01	1,06E+00	< 1
8	2.400	4,56E-01	1,19E+00	< 1
9	2.400	4,04E-01	1,34E+00	< 1
10	2.400	3,69E-01	1,47E+00	< 1

Tabela 11: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido aderido das seções I a III.

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. de deposição (m/s)	Tempo de deposição (h)	Tempo de deposição (dias)
1	4.270	3,89E-01	1,43E-03	< 1
2	4.270	1,99E-01	2,79E-03	< 1
3	4.270	1,01E-01	5,51E-03	< 1
4	4.270	3,14E-02	1,77E-02	< 1
5	4.270	9,97E-03	5,57E-02	< 1
6	4.270	1,41E-03	3,94E-01	< 1
7	4.270	1,35E-04	4,13E+00	< 1
8	4.270	1,08E-05	5,15E+01	2,15

Tabela 12: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido aderido da seção IV.

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. de deposição (m/s)	Tempo de deposição (h)	Tempo de deposição (dias)
1	4.500	4,03E-01	1,34E+00	< 1
2	4.500	2,08E-01	2,61E+00	< 1
3	4.500	1,06E-01	5,13E+00	< 1
4	4.500	3,34E-02	1,62E+01	< 1
5	4.500	1,07E-02	5,07E+01	2,11
6	4.500	1,51E-03	3,59E+02	14,95
7	4.500	1,44E-04	3,76E+03	156,65
8	4.500	1,16E-05	4,69E+04	1.953,52

Tabela 13: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido aderido da seção V.

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. de deposição (m/s)	Tempo de deposição (h)	Tempo de deposição (dias)
1	4.230,8	1,50E+00	3,62E-01	< 1
2	4.230,8	1,29E+00	4,19E-01	< 1
3	4.230,8	1,16E+00	4,68E-01	< 1
4	4.230,8	1,04E+00	5,20E-01	< 1
5	4.230,8	9,47E-01	5,72E-01	< 1
6	4.230,8	8,59E-01	6,31E-01	< 1
7	4.230,8	7,78E-01	6,97E-01	< 1
8	4.230,8	6,97E-01	7,77E-01	< 1
9	4.230,8	6,16E-01	8,79E-01	< 1
10	4.230,8	5,63E-01	9,63E-01	< 1



Tabela 14: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido aderido da seção VI a VIII.

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. de deposição (m/s)	Tempo de deposição (h)	Tempo de deposição (dias)
1	4.166,7	1,48E+00	3,66E-01	< 1
2	4.166,7	1,28E+00	4,24E-01	< 1
3	4.166,7	1,14E+00	4,73E-01	< 1
4	4.166,7	1,03E+00	5,25E-01	< 1
5	4.166,7	9,37E-01	5,78E-01	< 1
6	4.166,7	8,50E-01	6,37E-01	< 1
7	4.166,7	7,70E-01	7,04E-01	< 1
8	4.166,7	6,90E-01	7,85E-01	< 1
9	4.166,7	6,10E-01	8,88E-01	< 1
10	4.166,7	5,57E-01	9,72E-01	< 1

Tabela 15: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido excedente da seção I a III.

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. de deposição (m/s)	Tempo de deposição (h)	Tempo de deposição (dias)
1	4.270	5,65E-03	9,83E-02	< 1
2	4.270	1,48E-03	3,75E-01	< 1
3	4.270	5,36E-04	1,04E+00	< 1
4	4.270	4,13E-04	1,35E+00	< 1
5	4.270	3,46E-04	1,61E+00	< 1
6	4.270	2,70E-04	2,06E+00	< 1
7	4.270	1,59E-04	3,50E+00	< 1
8	4.270	7,43E-05	7,48E+00	< 1
9	4.270	3,30E-05	1,68E+01	< 1

Tabela 16: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido excedente da seção IV.

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. de deposição (m/s)	Tempo de deposição (h)	Tempo de deposição (dias)
1	4.500	6,05E-03	8,95E+01	3,73
2	4.500	1,59E-03	3,42E+02	14,23
3	4.500	5,74E-04	9,43E+02	39,30
4	4.500	4,42E-04	1,23E+03	51,09
5	4.500	3,70E-04	1,46E+03	60,94
6	4.500	2,89E-04	1,88E+03	78,14
7	4.500	1,70E-04	3,19E+03	132,84
8	4.500	7,95E-05	6,81E+03	283,84
9	4.500	3,53E-05	1,53E+04	638,65

### 2.3.3. Tempo de Simulação

Para a estimativa do tempo de simulação é necessário o conhecimento do tempo total gasto para o descarte de todo o material e, ainda, do tempo ao qual este material estará sujeito à deposição no ambiente, como o apresentado no item 2.3.2 (Velocidade e Tempo de Queda dos Sólidos).

Estima-se que, neste estudo, o tempo total de descarte será de 23,63 dias – soma dos tempos previstos para o descarte de todas as seções. O tempo de simulação deve ser suficiente para que a maior parte do material descartado seja depositada no assoalho oceânico.

Em relação à análise do tempo de queda dos sólidos, é preciso cuidado especial com aqueles que demandam maiores períodos para deposição. É importante ressaltar que esses longos períodos são referentes a classes granulométricas extremamente finas (<14  $\mu\text{m}$ ) e são representadas por baixas frações do material. Para essas frações granulométricas, a dispersão no ambiente será tão eficiente que tais classes não formarão pilhas de deposição significativas no assoalho marinho. No entanto, contribuirão significativamente para a alteração na concentração dos sedimentos em suspensão. As demais classes granulométricas levam menos de 1 dia para sua total deposição.

Dessa forma, visando associar a melhor representação do descarte a um custo computacional viável, estipulou-se um tempo de simulação de **24 dias**, ~0,4 dias além do tempo total de descarte.

### 2.3.4. Características das Simulações

#### 2.3.4.1. Simulações Probabilísticas

A modelagem determinística consiste em estudar o comportamento do contaminante em um determinado cenário ambiental, apresentando instantâneos deste comportamento em tempos definidos pelo usuário. Cabe à simulação probabilística averiguar o comportamento da dispersão sob a influência de uma extensa combinação de cenários ambientais e determinar a probabilidade de presença do contaminante em cada região de domínio do modelo. A Figura 6 ilustra como um resultado probabilístico é calculado a partir de  $n$  casos determinísticos.

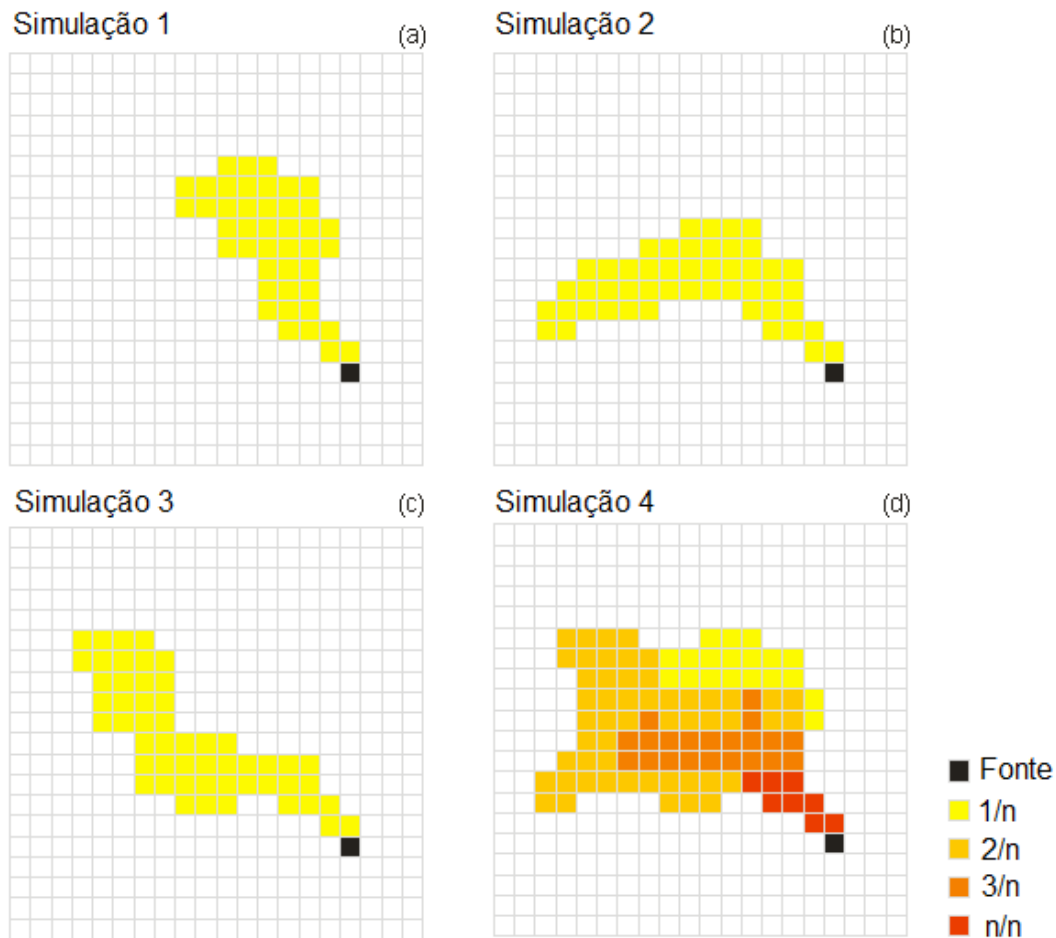


Figura 6: Representação esquemática do cálculo da probabilidade de presença do constituinte a partir de  $n$  casos determinísticos.

Era prática usual nos estudos de licenciamento ambiental que as simulações fossem executadas a partir da seleção prévia de alguns cenários ambientais específicos, comumente separados por estações do ano – verão e inverno – ou por casos extremos de correntes – mais intensas e mais fracas. Tal prática permite um dimensionamento das espessuras e do alcance máximo dos depósitos do material descartado no assoalho marinho, entretanto, a seleção dos cenários ambientais extremos limita a análise dos resultados a situações específicas com baixa probabilidade de ocorrência, tornando imperativo o emprego de interpretações dos resultados bem conservadoras. Para regiões de águas profundas, a incerteza da modelagem é ainda maior, quando comparada aos resultados de águas rasas. Essa questão é abordada na Nota Técnica nº 06/09, emitida pelo CGPEG/IBAMA. Para uma maior certeza sobre as reais áreas potencialmente impactadas e espessuras formadas, é necessário um estudo probabilístico, no qual uma grande quantidade de cenários ambientais é avaliada e não apenas os casos extremos.

Mesmo com o advento dos modelos numéricos de simulação de cascalho e fluido aderido, todos ainda são limitados a simulações determinísticas, ao contrário dos modelos numéricos de dispersão de óleo, que apresentam análises em cenários probabilísticos. Dessa forma, foi proposta pela PROOCEANO, a aplicação de uma metodologia que consiste em simular um determinado número de casos determinísticos no DREAM e após a obtenção desses resultados, extrair qual seria a probabilidade de ocorrência do constituinte para cada ponto de grade.

A aplicação desta metodologia consome um maior tempo para processamento e pós-processamento dos dados, em comparação com os modelos probabilísticos de óleo, mas sua confecção é viável. Esse tempo é variável e dependente da quantidade de cenários determinísticos simulados e do tempo de duração de cada descarte.

Dessa forma, a metodologia a ser empregada deve ser suficiente para captar a variabilidade ambiental e, ao mesmo tempo ser viável – a preparação de 300 simulações determinísticas manualmente seria inviável, por exemplo. Para tal, foi proposto a delimitação de 1 ano para análise, o qual foi dividido em verão e inverno, e para cada período foram simulados descartes de 24 dias (tempo de simulação estimado no item 2.3.3). A separação sazonal definida será exposta no item 2.4 (Forçantes).

Conforme dito anteriormente, para a separação em cenários sazonais, foi considerado o mesmo critério descrito na Modelagem de Óleo e na Modelagem Hidrodinâmica (TETRA TECH, 2015): a análise dos dados de ventos e correntes. O período de **verão** compreende os meses de **janeiro a junho** e os meses de **julho a dezembro**, caracterizam o período de **inverno**.

A Tabela 17 apresenta o número de simulações determinísticas realizadas para cada período sazonal escolhido: verão e inverno. O intervalo entre cada simulação, tanto de verão quanto de inverno, foi de 5 dias e o ano escolhido foi o de 2010.

Tabela 17: Número de simulações determinísticas realizadas para compor cada um dos cenários probabilísticos escolhidos.

<b>Cenários Sazonais</b>	<b>Número de Simulações</b>
Verão	33
Inverno	33

A Figura 7 apresenta, de maneira esquemática, todas as simulações que foram realizadas para o período de verão (janeiro a junho) e inverno (julho a dezembro). Nota-se que as simulações abrangem todo o ano de dados disponíveis.

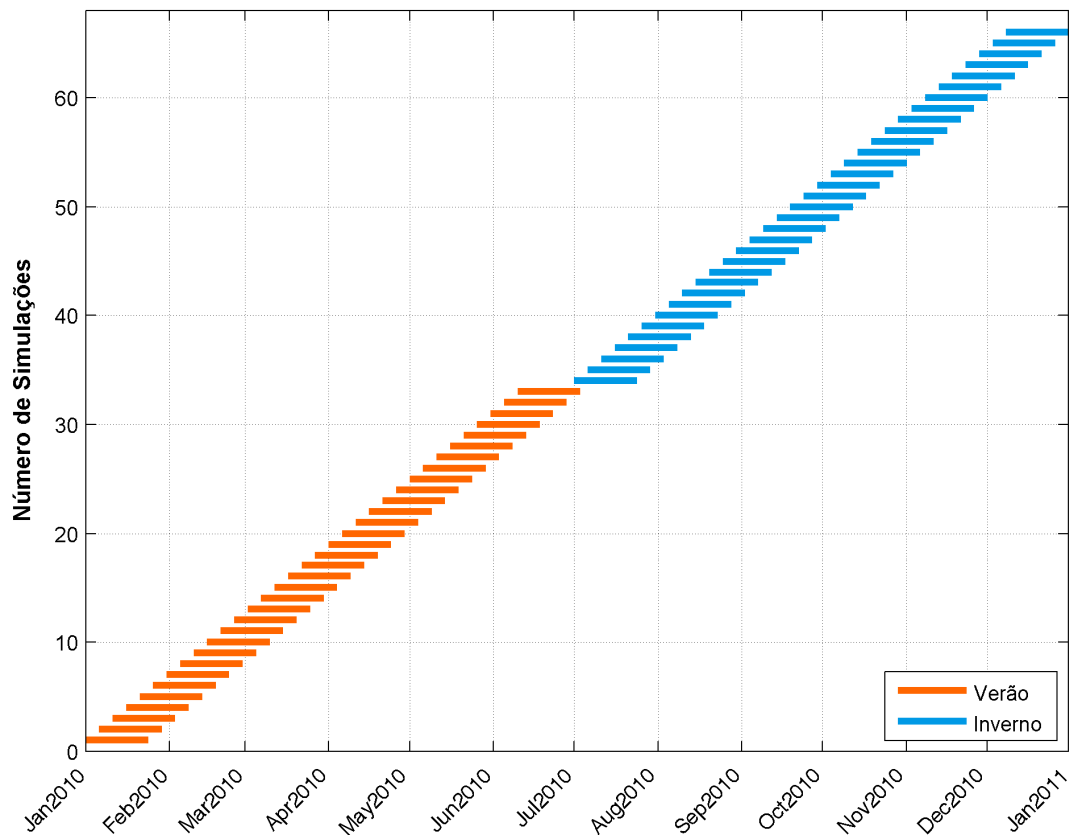


Figura 7: Número de simulações realizadas por período do ano. Cada barra colorida reflete uma simulação distinta com duração de 24 dias (tempo total de simulação). Em laranja, são apresentadas as simulações determinísticas realizadas para o verão (janeiro a junho) e, em azul, as realizadas para o inverno (julho a dezembro).

O maior impacto causado pelo descarte de cascalho e fluido aderido resultante da perfuração marítima é o acúmulo de sólidos no fundo oceânico. Ainda levando em conta a viabilidade do trabalho – uma modelagem probabilística dos sólidos em suspensão demandaria o dobro das simulações determinísticas realizadas, já que essas exigem, normalmente, uma grade maior (item 2.3.6) e um maior refinamento temporal – e a importância dos resultados a serem apresentados, a apresentação da modelagem probabilística restringiu-se às pilhas de deposição formadas no assoalho oceânico. As concentrações dos sólidos em suspensão na coluna d'água serão limitadas às apresentações nos resultados determinísticos.

#### 2.3.4.2. Simulações Determinísticas

Para a escolha dos cenários determinísticos a serem apresentados, foram considerados dois critérios: **espessura máxima** e **distância máxima da fonte**. Dessa forma, dentre todos os cenários determinísticos rodados, tanto de verão quanto de inverno, serão escolhidos dois

casos distintos: aquele em que foi obtido o valor máximo de espessura no fundo e o que atingiu a maior distância da fonte, considerando o limiar mais conservador (0,01 mm).

Para estas simulações serão apresentados resultados referentes às pilhas de deposição e às plumas de sólidos em suspensão.

## 2.3.5. Limiar de Monitoramento

### 2.3.5.1. Pilhas de Deposição

O estudo de Kjeilen-Eilertsen *et al.* (2004) apresenta uma revisão bibliográfica (KRANZ, 1974; MAURER *et al.*, 1980 e 1981; BELLCHAMBERS & RICHARDSON, 1995; CHANDRASEKARA & FRID, 1998; HOLTHAUS *et al.*, 2003) dos limites mínimos de espessura para os quais são identificados efeitos nocivos em diversos grupos e espécies de organismos bentônicos. São considerados 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) 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 são os seguintes:

- » Para sedimentos exógenos (não-nativos): 0,96 cm;
- » Para sedimentos endógenos (nativos): 0,65 cm.

Com base nessa análise, é ainda sugerido, no estudo de Kjeilen-Eilertsen *et al.* (2004), que o limite em que já não são sentidos efeitos nocivos seja de 0,5 cm, podendo este ser utilizado como limiar para estudos de modelagem de cascalho e fluidos de perfuração.

Baseado nas referências bibliográficas apresentadas acima, percebe-se que o limiar de 0,1 cm (1 mm) seria conservador o suficiente para a representação e estimativa das pilhas de deposição formadas no assoalho marinho. Entretanto, os Termos de Referência elaborados pela CGPEG/DILIC/IBAMA para modelagens de cascalho e fluido aderido normalmente exigem que as pilhas de deposição sejam avaliadas até o limiar de 0,01 mm. Dessa forma, visando atender ao que usualmente é solicitado, os resultados serão apresentados considerando o limiar de 0,01 mm, sendo sempre comparados com o que foi obtido para 1 mm.

### 2.3.5.2. Sólidos em Suspensão

Smit *et al.* (2006) analisou diversos estudos prévios realizados para identificar o efeito do descarte de cascalho e fluido aderido nos organismos nectônicos. Segundo esses estudos, o menor limiar ao qual os organismos estão sujeitos a alterações significativas, em descartes com fluido de base água, foi de 10 mg/l (~10 ppm). Apesar desse limiar levar em consideração resultados de descartes de fluidos de base aquosa, é importante ressaltar que essa abordagem é aceitável, já que esses são os que se dispersam por mais tempo na coluna d'água, sendo os mais impactantes aos organismos nectônicos. Sendo assim, buscando uma abordagem conservadora, o limiar monitorado no estudo foi de 5 ppm.

### 2.3.6. Descrição da Grade

Os efeitos dos descartes de sólidos no mar variam consideravelmente de acordo com a distância vertical entre a fonte e o assoalho marinho. Nas seções onde o descarte é feito próximo ao fundo (sem utilização do *riser*), o material tende a formar uma pilha de deposição significativamente maior que aquela associada aos descartes que ocorrem junto à superfície. Por outro lado, o material descartado da superfície (com *riser*) irá percorrer uma distância maior, sofrendo influência das forças locais e cobrindo uma área mais extensa quando depositado. Entretanto, também há a questão do tipo de fluido que é descartado, devido a sua menor densidade, os sólidos presentes nos fluidos de base água tendem a se dispersar mais que aqueles derivados de fluidos de base sintética.

Em estudos de modelagem, a relação entre a resolução da grade projetada e a escala do fenômeno estudado é vital na obtenção de bons resultados. Deve-se atentar para o fato de que uma grade ampla, que abranja toda a região de deposição ou de dispersão dos sólidos em suspensão, pode não ter resolução suficiente para mapear com exatidão a região de maior espessura. Da mesma forma, uma grade de alta resolução pode não cobrir uma área suficientemente grande como a que se espera para a deposição do material ou dispersão dos sólidos.

Como solução para o problema apresentado acima, é proposto o uso de duas grades distintas: a primeira com tamanho e resolução suficientes para representar a região de maior acúmulo de sedimentos; e a segunda, com maior área, porém menos refinada, voltada para o alcance dos sólidos em suspensão. Os domínios das grades utilizadas no estudo são apresentados na Figura 8. A grade indicada em azul é referente à pilha de deposição e a grade indicada em verde está relacionada à pluma de sólidos em suspensão.

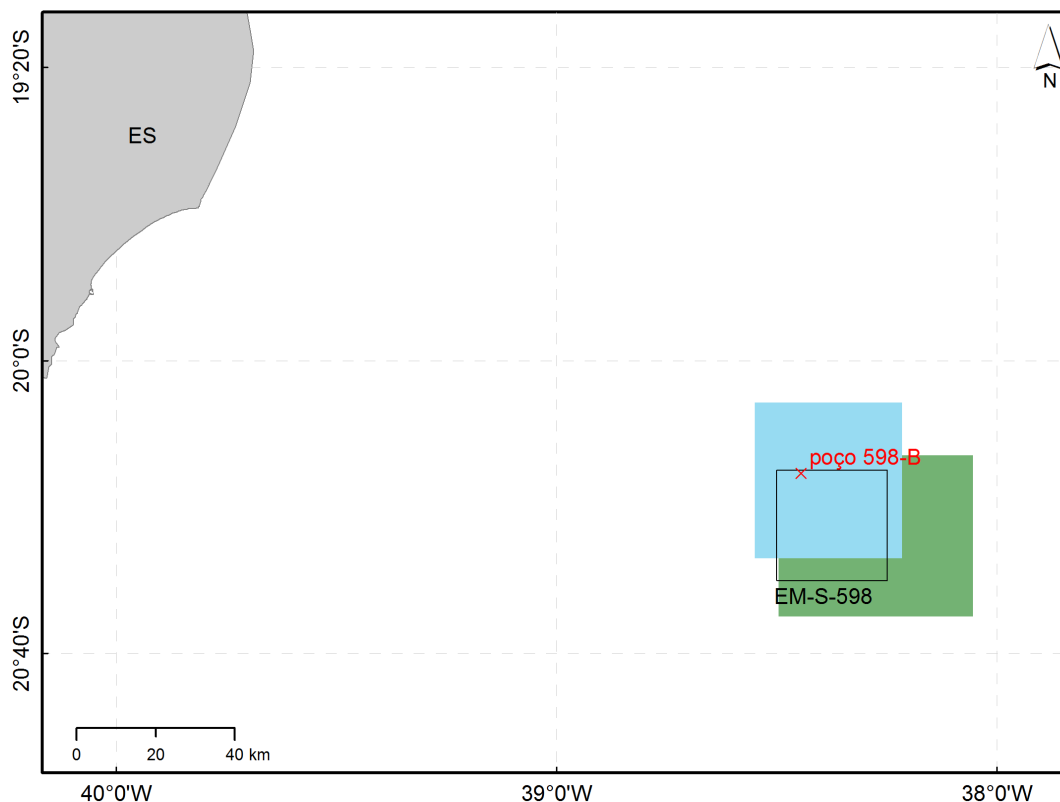


Figura 8: Domínios das grades utilizadas na modelagem para a pilha de deposição (em azul); e para a pluma de sólidos em suspensão (em verde) (*Datum SIRGAS 2000*).

A grade utilizada para a deposição apresenta um espaçamento de 40 m nas direções zonal e meridional e 192 m em cada nível de profundidade. Os seus limites são: ao sul, 20°27'00"S, ao norte, 20°05'43"S, a oeste, 38°32'56"W, e a leste, 38°12'51"W. Obtendo assim uma matriz com 868x983 células em superfície e 10 células verticais. Já a grade para os sólidos em suspensão foi construída com um espaçamento de 50 m nas direções zonal e meridional e 30 m na direção vertical. Esta grade apresenta 916x802 células em superfície e 65 células verticais, com seus limites compreendidos entre: 20°35'04"S e 20°13'00"S, em latitude, e 38°29'42"W e 38°03'16"W, em longitude. Para fins de modelagem, foi considerada uma profundidade uniforme de 1.952 m em todo o domínio da grade, que corresponde à profundidade da lâmina d'água local informada pela Statoil.

## 2.4. Forçantes

Conforme dito anteriormente, a separação sazonal definida para o presente estudo seguiu o mesmo critério adotado no estudo de modelagem de óleo e de modelagem hidrodinâmica apresentado neste mesmo processo de licenciamento, onde o período de verão corresponde



aos meses de **janeiro a junho** e o período de inverno aos meses de **julho a dezembro**. Para manter a coerência, todos os parâmetros de entrada do modelo de dispersão (correntes, temperatura e salinidade do mar, ventos e temperatura do ar) serão apresentados de acordo com os períodos escolhidos.

### 2.4.1. Correntes

Nesse estudo, foi utilizado como forçante hidrodinâmica uma série temporal de 1 ano de dados (2010) dos resultados do modelo global disponibilizado pelo HYCOM *consortium*, descrito no item 2.1 (Modelo Hidrodinâmico).

A Figura 9 apresenta o ponto de grade do HYCOM mais próximo ao poço 598-B.

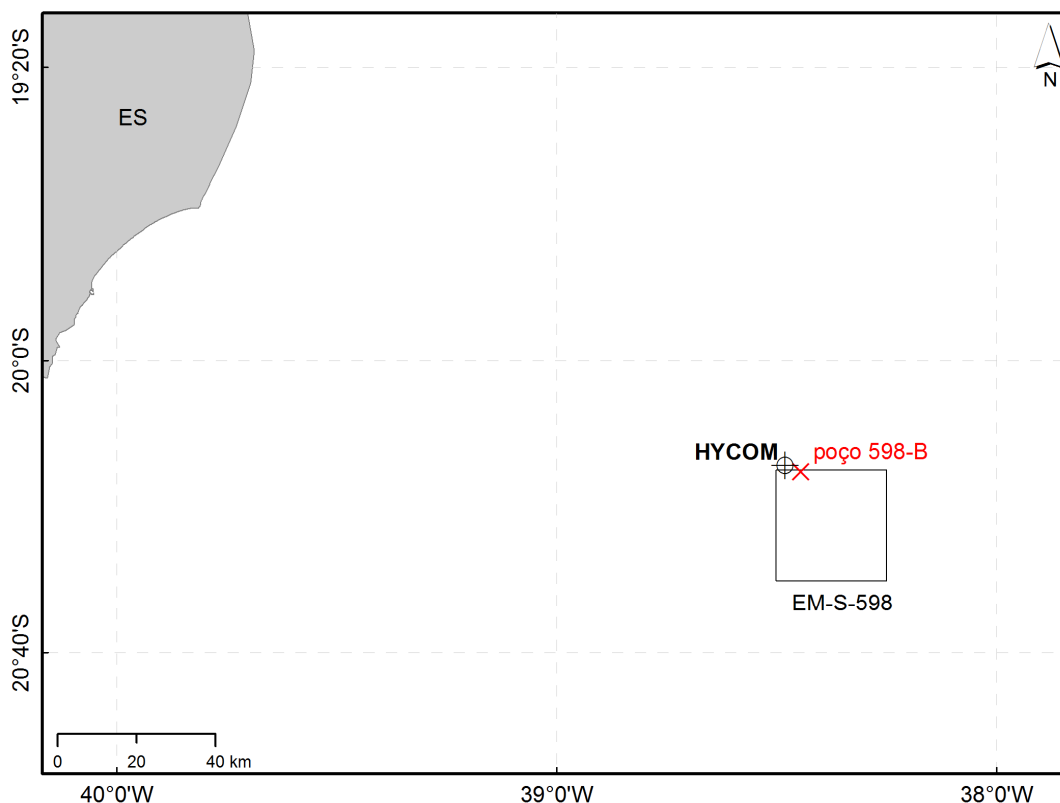


Figura 9: Localização do ponto de grade do HYCOM mais próximo ao local de descarte.

A seguir, na Figura 10 e na Figura 11, são apresentadas as rosas de correntes obtidas para o verão (janeiro a junho) e inverno (julho a dezembro), respectivamente, variando nas profundidades de 0, 100, 500 e 1.500 m, para o ponto mais próximo ao poço 598-B. A profundidade de 1.500 m coincide com o último nível disponível dos dados hidrodinâmicos para este local. Como as correntes de fundo não são muito variáveis, é aceitável considerar que as

correntes atuantes neste nível sejam as mesmas que as correntes no fundo da coluna d'água (1.952 m – lâmina d'água na localização pretendida do poço 598-B).

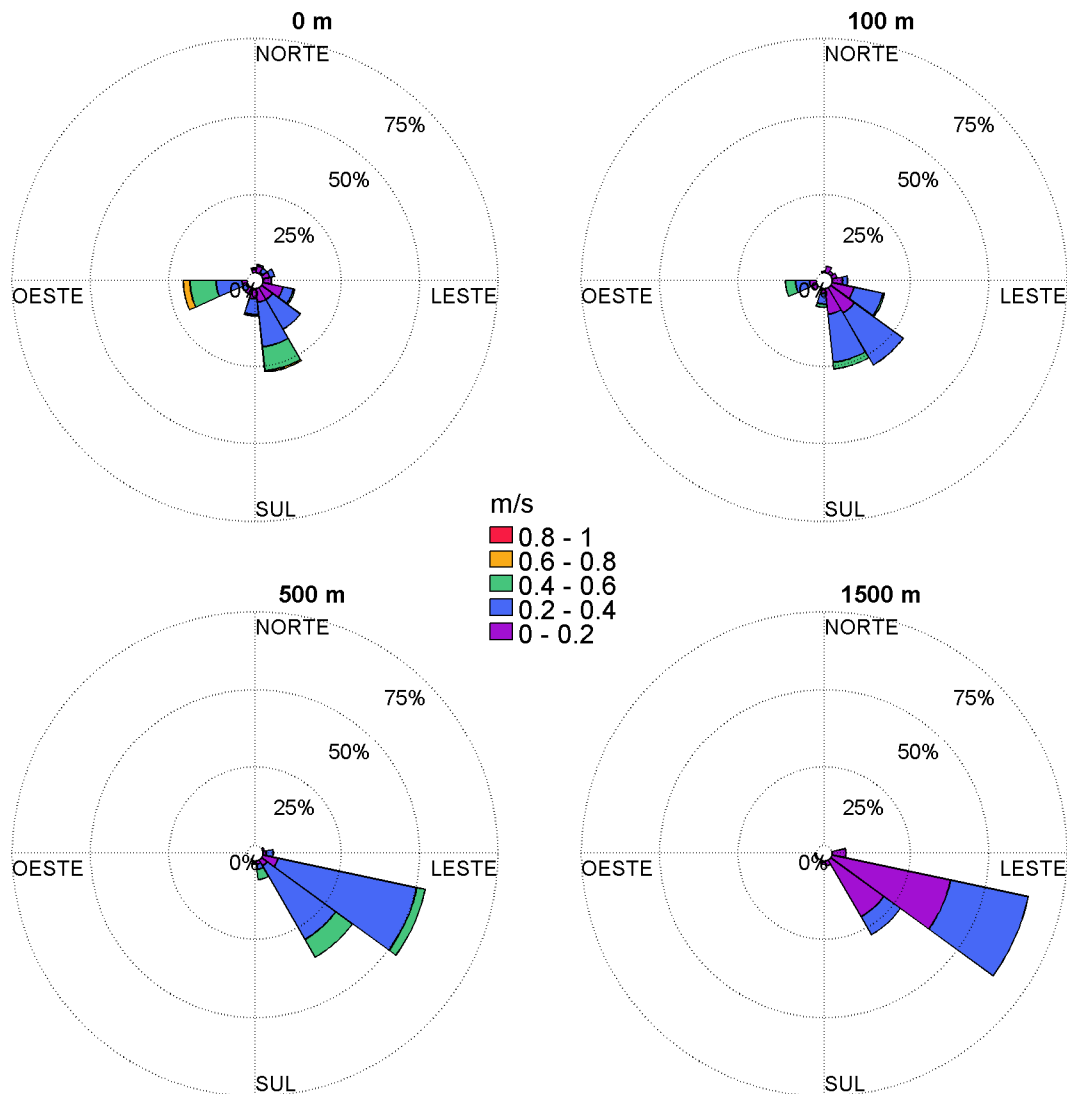


Figura 10: Histogramas direcionais de corrente nas profundidades de 0, 100, 500 e 1.500 metros, para o período representativo do cenário de verão (janeiro a junho), do ponto de grade do HYCOM mais próximo ao poço 598-B.

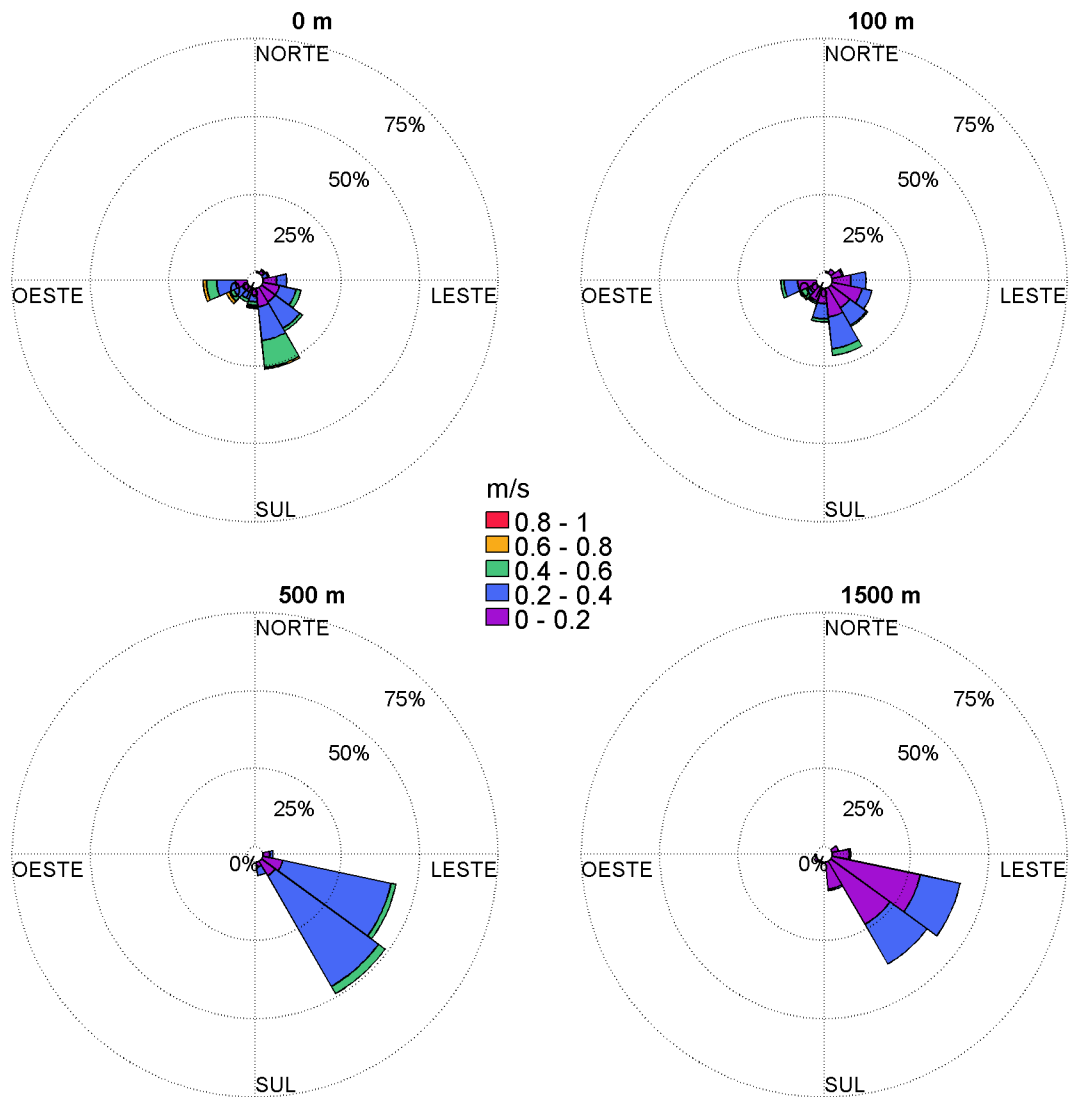


Figura 11: Histogramas direcionais de corrente nas profundidades de 0, 100, 500 e 1.500 metros, para o período representativo do cenário de inverno (julho a dezembro), do ponto de grade do HYCOM mais próximo ao poço 598-B.

A Tabela 18 apresenta os valores máximos de intensidade obtidos para ambos os cenários.

Tabela 18: Intensidades máximas de corrente obtidas para os cenários de verão (janeiro a junho) e inverno (julho a dezembro).

Profundidade (m)	Intensidade máxima (m/s)	
	Verão	Inverno
0	0,71	1,03
2	0,70	1,00
4	0,70	0,99
6	0,69	0,97
8	0,69	0,97
10	0,68	0,96
12	0,68	0,94
15	0,66	0,93
20	0,63	0,88
25	0,54	0,76
30	0,52	0,69
35	0,53	0,67
40	0,55	0,66
45	0,59	0,67
50	0,62	0,70
60	0,65	0,69
70	0,65	0,67
80	0,64	0,65
90	0,62	0,64
100	0,60	0,63
125	0,54	0,56
150	0,49	0,50
200	0,43	0,40
250	0,41	0,46
300	0,42	0,46
350	0,46	0,46
400	0,49	0,48
500	0,52	0,47
600	0,51	0,51
700	0,58	0,51
800	0,61	0,47
900	0,61	0,46
1000	0,42	0,42
1250	0,48	0,36
1500	0,31	0,33

Em ambos os cenários, a corrente predominante na coluna d'água toda é para sudeste, com algumas mudanças de direção para sudoeste, em superfície. Em relação à intensidade, são observadas variações significativas na intensidade superficial entre os cenários sazonais, com o inverno apresentando o maior valor (1,03 m/s). A partir de 70 m, não são observadas diferenças expressivas entre as intensidades.

## 2.4.2. Temperatura e Salinidade do Mar

Para a temperatura e a salinidade do mar, foram utilizados dados do WOA13 (*World Ocean Atlas*). Os campos que compõem a base de dados da climatologia WOA13 consistem na análise objetiva dos dados históricos armazenados no NODC (*National Oceanographic Data Center*), coletados por diversas campanhas e equipamentos, em navios de pesquisa e de oportunidade. Esta análise objetiva utiliza dados irregularmente espaçados, gerando uma grade global com resolução espacial de  $1/4^\circ$ . Estes campos são tridimensionais e os dados são interpolados em 33 profundidades padrão, desde a superfície até 5.500 m de profundidade. Temporalmente, a climatologia consiste na média realizada para o período compreendido entre os anos de 1955 e 2012. São disponibilizadas médias climatológicas mensais, anuais e por estação (verão, inverno, primavera e outono). Os dados do WOA13 podem ser obtidos através da página do projeto na internet (<https://www.nodc.noaa.gov/OC5/SELECT/woaselect/woaselect.html>). Maiores informações sobre as bases climatológicas de temperatura e salinidade podem ser obtidas em Locarnini *et al.* (2009) e Antonov *et al.* (2009).

A Figura 12 apresenta a localização do ponto do WOA13 de onde foram extraídos os perfis de temperatura e salinidade.

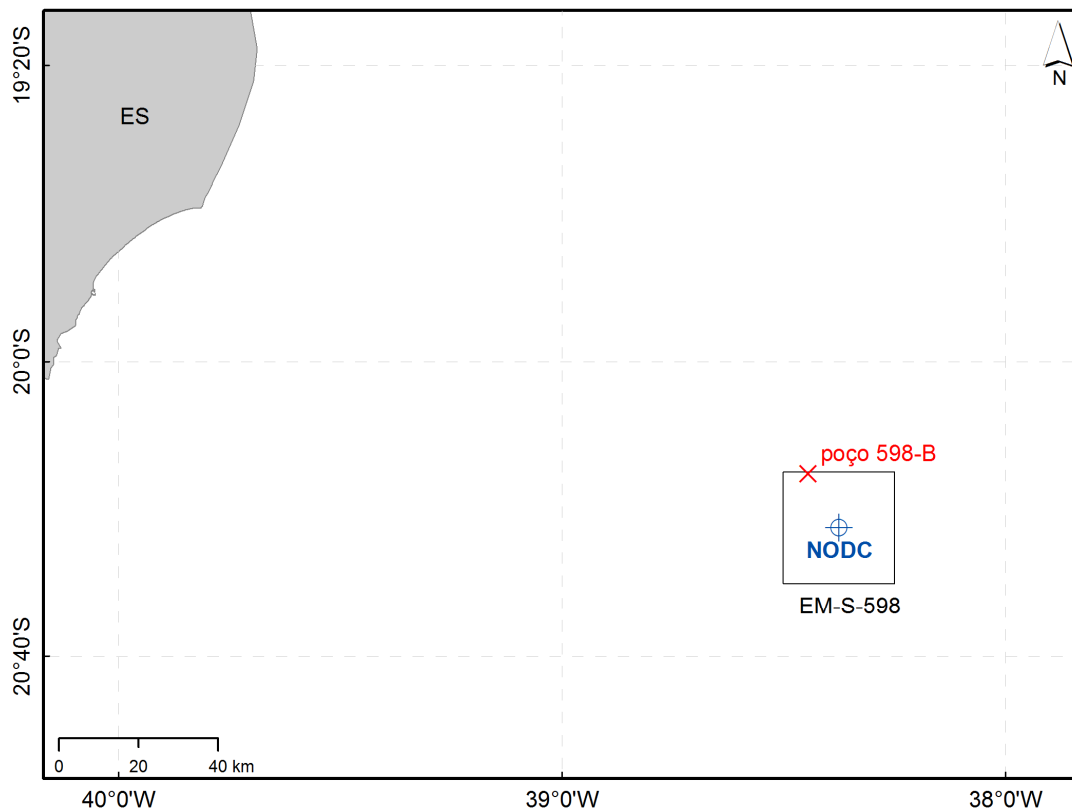


Figura 12: Localização do ponto de grade do NODC mais próximo ao local de descarte.

No DREAM, apesar de ser utilizada uma série temporal para representar a variabilidade dos dados de corrente, os parâmetros temperatura e salinidade do mar não seguem esse padrão. O usuário do modelo tem a opção de inserir apenas um perfil para cada cenário. Desta forma, foram selecionadas as médias climatológicas da base WOA13 para cada período (verão – janeiro a junho – e inverno – julho a dezembro).

Os perfis obtidos de temperatura e salinidade, juntamente com a densidade calculada, são apresentados na Figura 13 e os valores na Tabela 19 e Tabela 20, para o verão e inverno, respectivamente.

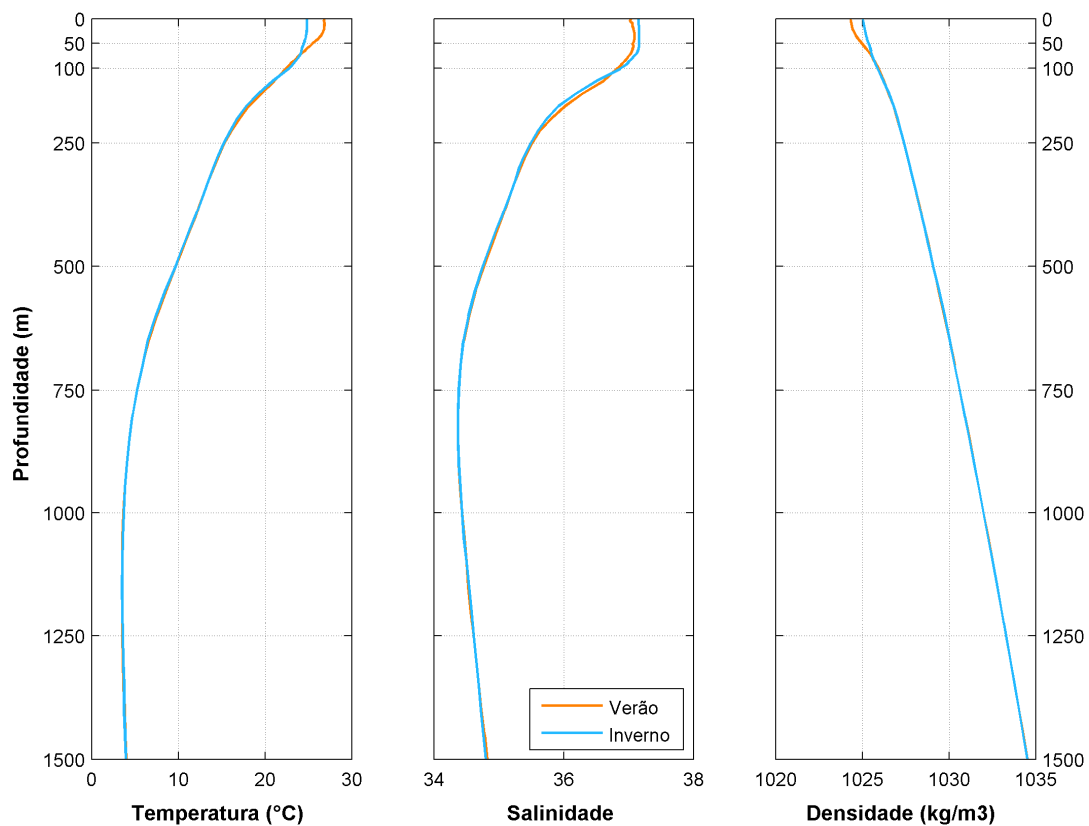


Figura 13: Perfis de temperatura, salinidade e densidade para o ponto do NODC mais próximo ao poço 598-B.

Tabela 19: Temperatura, salinidade e densidade para o período de verão.

<b>Profundidade (m)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Salinidade</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>
0	26,79	37,03	1024,32
5	26,76	37,02	1024,34
10	26,83	37,06	1024,37
25	26,70	37,08	1024,49
50	25,45	37,06	1024,98
75	23,82	37,00	1025,53
100	22,40	36,82	1025,92
125	21,05	36,61	1026,25
150	19,60	36,29	1026,51
175	18,11	36,02	1026,79
200	17,05	35,81	1027,00
225	16,09	35,63	1027,20
250	15,30	35,51	1027,40
275	14,64	35,41	1027,58
300	14,04	35,33	1027,77
325	13,49	35,25	1027,93
350	12,97	35,18	1028,10
375	12,44	35,12	1028,27
400	11,93	35,05	1028,43
425	11,35	34,98	1028,60
450	10,80	34,91	1028,76
475	10,24	34,84	1028,92
500	9,69	34,77	1029,08
550	8,54	34,64	1029,40
600	7,49	34,54	1029,72
650	6,55	34,46	1030,02
700	5,82	34,41	1030,32
750	5,20	34,38	1030,61
800	4,71	34,37	1030,89
850	4,33	34,37	1031,17
900	4,05	34,38	1031,44
950	3,83	34,40	1031,71
1000	3,67	34,43	1031,99
1050	3,56	34,47	1032,26
1100	3,51	34,50	1032,52
1150	3,50	34,53	1032,77
1200	3,51	34,57	1033,03
1250	3,53	34,61	1033,28
1300	3,62	34,65	1033,53
1350	3,68	34,69	1033,78
1400	3,78	34,73	1034,03
1450	3,87	34,78	1034,28
1500	3,95	34,82	1034,53

Tabela 20: Temperatura, salinidade e densidade para o período de inverno.

<b>Profundidade (m)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Salinidade</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>
0	24,82	37,15	1025,02
5	24,80	37,15	1025,05
10	24,80	37,15	1025,07
25	24,78	37,16	1025,15
50	24,47	37,16	1025,35
75	23,93	37,08	1025,56
100	22,73	36,87	1025,86
125	20,88	36,50	1026,21
150	19,25	36,19	1026,52
175	17,83	35,92	1026,79
200	16,77	35,74	1027,02
225	15,98	35,60	1027,21
250	15,21	35,49	1027,41
275	14,56	35,39	1027,59
300	13,98	35,31	1027,76
325	13,47	35,25	1027,94
350	12,97	35,18	1028,10
375	12,45	35,11	1028,26
400	11,90	35,04	1028,43
425	11,32	34,96	1028,59
450	10,76	34,89	1028,75
475	10,17	34,82	1028,92
500	9,66	34,75	1029,07
550	8,45	34,63	1029,41
600	7,38	34,53	1029,73
650	6,44	34,45	1030,03
700	5,84	34,41	1030,31
750	5,23	34,38	1030,60
800	4,72	34,37	1030,89
850	4,35	34,37	1031,17
900	4,06	34,38	1031,44
950	3,83	34,41	1031,72
1000	3,70	34,43	1031,98
1050	3,58	34,46	1032,25
1100	3,52	34,50	1032,52
1150	3,50	34,54	1032,78
1200	3,53	34,58	1033,03
1250	3,58	34,61	1033,28
1300	3,65	34,65	1033,53
1350	3,72	34,69	1033,78
1400	3,74	34,72	1034,02
1450	3,85	34,76	1034,27
1500	3,92	34,80	1034,51



### 2.4.3. Ventos

Os dados de vento utilizados como forçante no modelo são provenientes das Reanálises do NCEP – *National Centers for Environmental Prediction* – (KALNAY *et al.*, 1996). A base de dados conhecida como “Reanálises do NCEP” foi originada a partir de uma cooperação entre o NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) e o NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), com intuito de produzir inicialmente uma rede de 40 anos de dados meteorológicos globais com base nas análises dos campos atmosféricos (KALNAY *et al.*, 1996). Posteriormente, esse projeto foi ampliado para uma janela de tempo de 50 anos (KISTLER *et al.*, 2001), e atualmente, estão disponíveis mais de 60 anos (1948-atual) de dados.

A Reanálise do NCEP (R-1) usa o estado da arte em sistemas de assimilação de dados e um banco de dados mais completo possível, abrangendo informações meteorológicas primárias das mais diversas fontes associadas aos dados do modelo atmosférico global do NCEP (KISTLER *et al.*, 2001).

Estes dados são amplamente utilizados pela comunidade científica, sendo, portanto adequados para utilização em estudos dessa natureza. Os dados primários utilizados para gerar as reanálises são de diferentes origens:

- » Dados globais de radiossondas.
- » Dados da superfície do mar obtidos através do projeto COADS (*Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set*) no período de 1983 a 1996 (14 anos), originados de diversas fontes, dentre elas, observações de navios, boias fixas, boias móveis e estações oceânicas próximas à superfície.
- » Dados aéreos, originados de observações por aeronaves em todo o globo, geralmente associados a projetos como GARP (*Global Atmospheric Research Program*) e GATE (*Global Atlantic Tropical Experiment*), por exemplo.
- » Dados de Satélite, que começaram a ser obtidos em 1967, através de diversos programas. Atualmente, o NCEP/NCAR utiliza dados fornecidos pelo projeto TOVS (*Operational Vertical Sounder System*), com variáveis em três dimensões, cuja resolução espacial média é de 2,5 graus.
- » Dados de vento em superfície, obtidos pelo sensor espacial Microwave/Imager (SSM/I) a partir de 1987, submetidos ao tratamento feito pela rede neural de Kransnopolsky *et al.* (1995) *apud* Kalnay *et al.* (1996).
- » Dados de cobertura de nuvens obtidos por estimativas dos dados de Satélites Meteorológicos Geoestacionários (SMG). Esses dados estão disponíveis desde 1978.

Todos os dados utilizados nas reanálises passam por um rigoroso controle de qualidade e recebem um tratamento diferenciado de acordo com a forma de obtenção. Utilizando-se técnicas de interpolação espaço-temporal, que levam em consideração não somente a estatística como também a dinâmica dos fenômenos meteorológicos (análise objetiva).

Para este estudo, foram utilizados os dados coincidentes com o período disponível para as correntes (ano de 2010), tendo uma frequência temporal de 6 horas (4 dados por dia). A resolução espacial na área em questão é de aproximadamente 1,8°, tendo sido utilizado o ponto de grade do NCEP mais próximo ao ponto de descarte (Figura 14). A seguir, são apresentadas as rosas dos ventos (Figura 15), elaboradas para os períodos sazonais escolhidos.

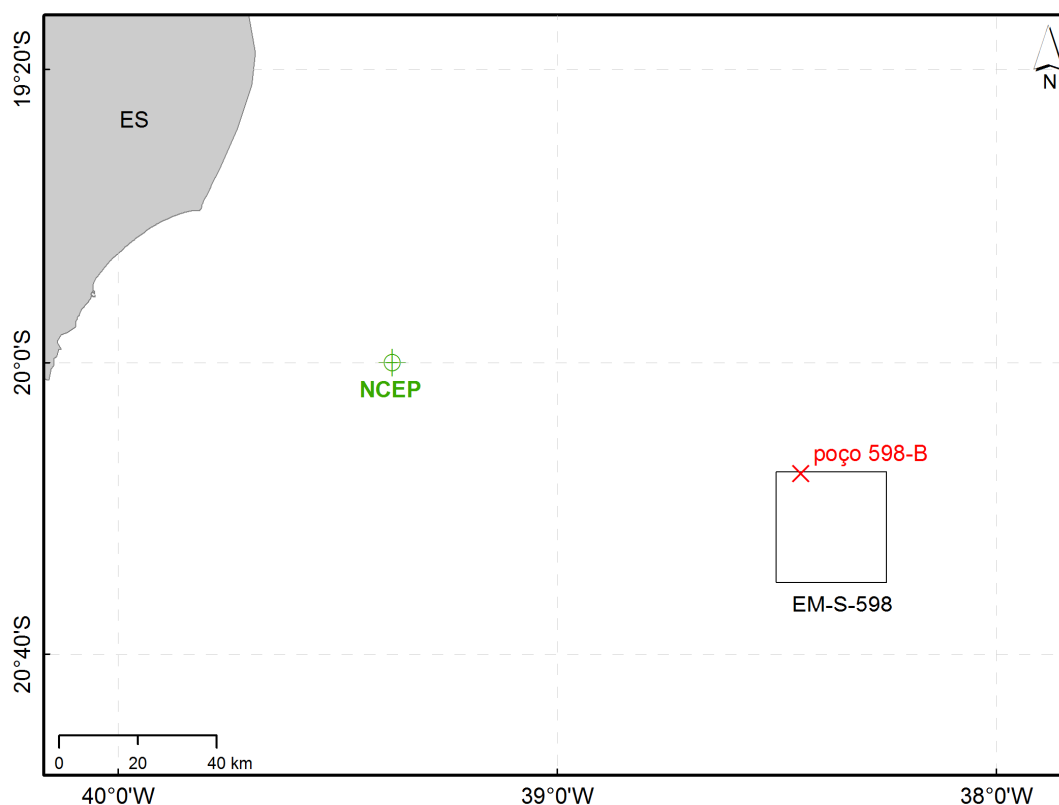


Figura 14: Localização do ponto de grade do NCEP mais próximo ao poço 598-B.

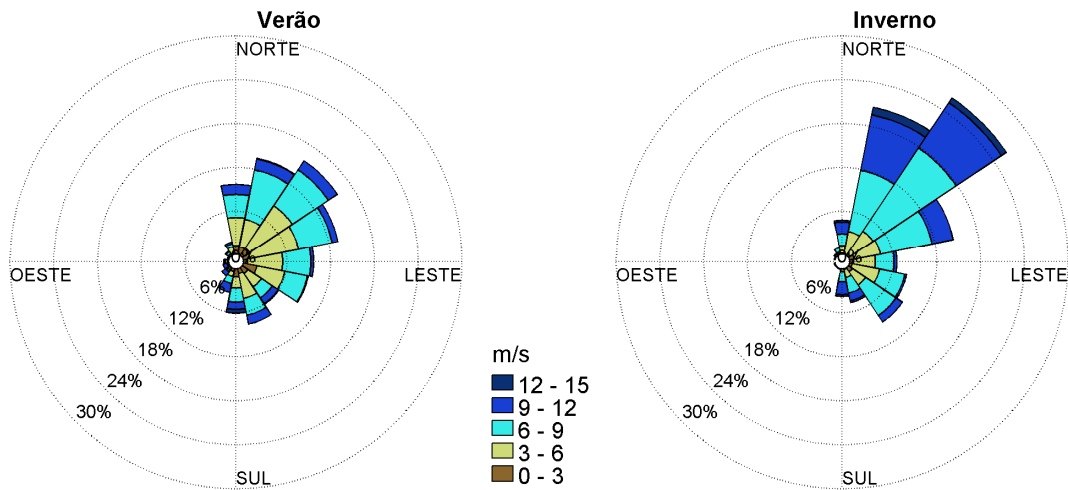


Figura 15: Histogramas direcionais para os ventos de cada cenário sazonal escolhido.

Ambos os cenários apresentam predominância de ventos de nordeste, com uma tendência maior de variação entre norte e sudeste no verão e sudeste/nordeste durante o inverno. As maiores intensidades ( $\geq 9$  m/s) são mais frequentes durante o inverno.

#### 2.4.4. Temperatura do Ar

Os dados de temperatura do ar utilizados como forçantes do modelo também são oriundos das Reanálises do NCEP. Assim como nos dados de temperatura e salinidade do mar, no DREAM há a opção de inserir apenas um valor de temperatura do ar para cada cenário. Sendo assim, optou-se também por utilizar os valores médios de cada período, apresentados na Tabela 21.

Tabela 21: Temperatura do ar característica para cada cenário.

Cenários sazonais	Temperatura do ar (°C)
Verão	26,07
Inverno	23,51

### 3. Resultados

A seguir, serão apresentados os resultados probabilísticos e determinísticos das simulações de dispersão de cascalho e fluido aderido, para os cenários sazonais de verão (janeiro a junho) e inverno (julho a dezembro).

Na abordagem probabilística são realizadas diversas simulações determinísticas, considerando todos os processos citados nos itens anteriores, para diferentes condições meteo-oceanográficas. Os resultados probabilísticos são de grande importância, pois ilustram tanto a abrangência da área passível de ser afetada pelo descarte de cascalho e fluido aderido quanto às regiões com maior probabilidade de serem afetadas por tal descarte.

Para a obtenção destes resultados foram realizadas diferentes simulações, com intervalos temporais de 5 dias, para cada estação (verão e inverno). Visto que o impacto principal da atividade é o empilhamento de material no assoalho oceânico, os resultados probabilísticos aqui apresentados são restritos à espessura resultante no fundo. Serão apresentados mapas de probabilidade de presença na região para determinados limiares de espessura e mapas da espessura máxima obtida. As concentrações de sólidos em suspensão na coluna d'água serão apresentadas para os casos determinísticos selecionados.

Para a escolha dos cenários determinísticos a serem apresentados, foram considerados dois critérios: **espessura máxima dos depósitos no fundo** e **distância máxima da fonte dos depósitos no fundo**. Dessa forma, dentre todos os cenários determinísticos obtidos, tanto para o verão como para o inverno, serão apresentados dois resultados distintos, aquele em que foi obtido o valor máximo de espessura no fundo e o que atingiu a maior distância da fonte, considerando o limiar mais conservador (0,01 mm). Para tais casos, serão apresentados resultados de espessura, considerando a integração total de todos os descartes e a integração das seções com e sem *riser* analisadas separadamente, além da concentração dos sólidos em suspensão na coluna d'água.

A Figura 16 resume a forma como os resultados dos modos probabilísticos e determinísticos serão apresentados.

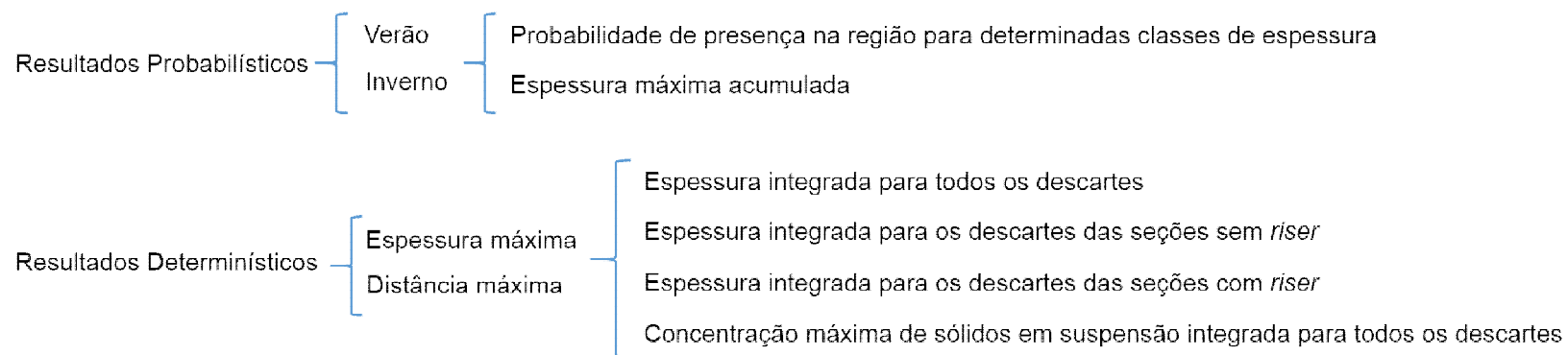


Figura 16: Fluxograma de apresentação dos resultados.

## 3.1. Resultados Probabilísticos

A seguir serão apresentados mapas de probabilidade de presença de espessuras acima de 0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm, considerando todos os casos determinísticos simulados. Serão também apresentados mapas com a espessura máxima observada acima de 0,01 mm, onde, para cada ponto de grade, foi extraído o maior valor de espessura obtido dentre todos os casos analisados. Os resultados serão apresentados, separadamente, para os cenários de verão e inverno.

### 3.1.1. Probabilidade de Presença dos Sólidos Depositados

#### 3.1.1.1. Verão

As probabilidades de presença dos sólidos depositados com espessura acima de 0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm, para o cenário de verão, considerando a integração de todos os descartes, são apresentadas na Figura 17.

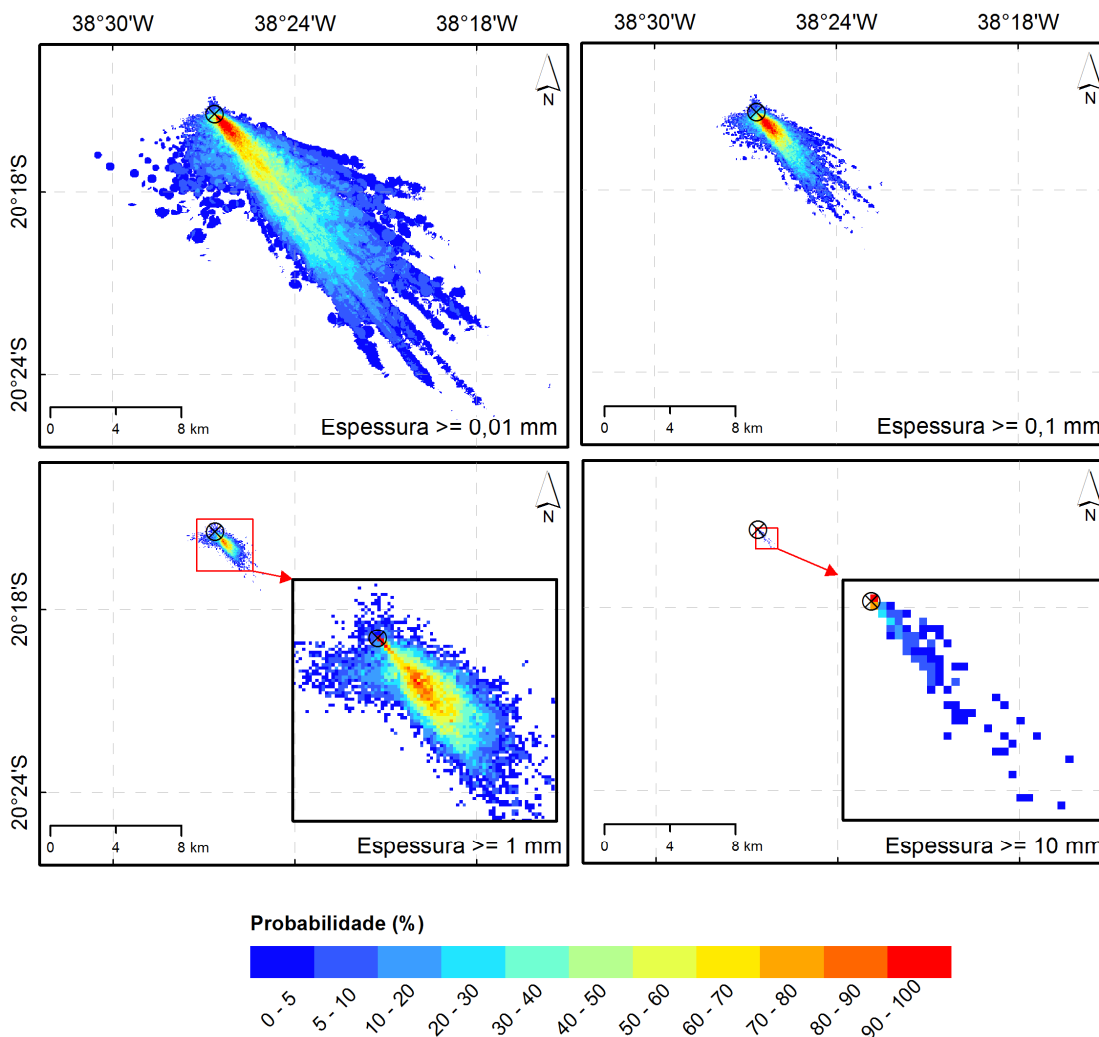


Figura 17: Mapa de probabilidade de presença dos sólidos depositados com espessuras superiores a 0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm, considerando todos os resultados determinísticos, no cenário de verão (*Datum* SIRGAS 2000).

A seguir, na Tabela 22, são apresentadas as áreas obtidas para algumas classes de probabilidade, durante o cenário de verão, considerando cada limiar monitorado.

Tabela 22: Áreas obtidas para as classes de probabilidade de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, considerando os distintos limiares monitorados. Cenário de verão.

Probabilidade	Área (km <sup>2</sup> )			
	Limiar de 0,01 mm	Limiar de 0,1 mm	Limiar de 1 mm	Limiar de 10 mm
> 0%	118,81	18,86	3,24	0,11
$\geq 25\%$	22,20	3,82	0,82	0,005
$\geq 50\%$	5,41	1,68	0,36	0,003
$\geq 75\%$	1,25	0,72	0,08	0,002
= 100%	0,15	0,04	0,003	0,002

Os resultados probabilísticos apontam a predominância de deposição dos sólidos para sudeste do local de descarte, com 100% dos cenários determinísticos contribuindo para essa caracterização. Uma área com baixas probabilidades também é observada ao sul do poço, sendo esta atribuída às seções com *riser* e limitada a uma distância de até 8 km da origem, no caso das espessuras acima de 0,01 mm.

Como esperado, os mapas apresentam uma diminuição significativa da probabilidade de presença dos sólidos depositados à medida que os maiores limiares são analisados, uma vez que não há formação de espessuras acima de alguns desses limiares em todos os cenários determinísticos. Para 0,01 mm, a área total com alguma probabilidade de presença é de 118,81 km<sup>2</sup>, um valor muito alto quando comparado ao resultado obtido para 1 mm, de 3,24 km<sup>2</sup>, e maior ainda quando se analisa o de 10 mm, de 0,11 km<sup>2</sup>.

### 3.1.1.2. *Inverno*

As probabilidades de presença dos sólidos depositados para as classes de espessura acima de 0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm para o cenário de inverno, considerando a integração de todos os descartes, são apresentadas da Figura 18.



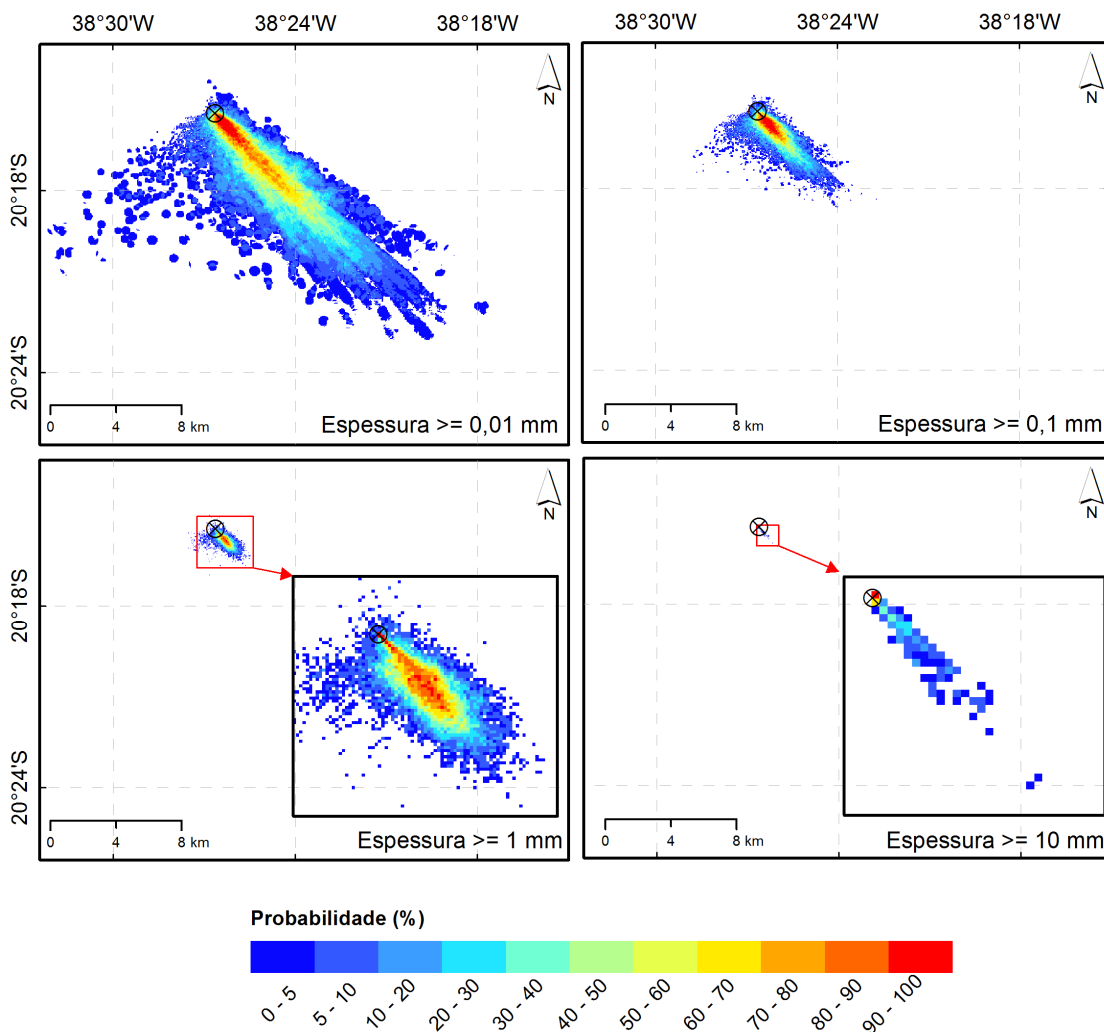


Figura 18: Mapa de probabilidade de presença de deposição dos sólidos de espessuras superiores a 0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm, considerando todos os resultados determinísticos no cenário de inverno (*Datum* SIRGAS 2000).

A seguir, na Tabela 23, são apresentadas as áreas obtidas para algumas classes de probabilidade, durante o cenário de inverno, considerando cada limiar monitorado.

Tabela 23: Áreas obtidas para as classes de probabilidade de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, considerando os distintos limiares monitorados. Cenário de inverno.

Probabilidade	Área (km <sup>2</sup> )			
	Limiar de 0,01 mm	Limiar de 0,1 mm	Limiar de 1 mm	Limiar de 10 mm
> 0%	107,74	17,05	2,84	0,10
$\geq 25\%$	22,29	4,00	0,77	0,008
$\geq 50\%$	8,78	1,97	0,41	0,003
$\geq 75\%$	2,95	0,99	0,21	0,002
= 100%	0,38	0,19	0,003	0,002

Não são observadas diferenças significativas entre a orientação de deposição dos descartes no cenário de inverno e verão; em ambos os cenários sazonais, os sólidos se depositam, predominantemente, para sudeste do poço. No inverno há, ainda, a presença de uma área de baixa probabilidade para sul e sudoeste, atrelada aos sólidos das seções com *riser*.

A área total com probabilidade de presença de depósitos acima de 0,01 mm é de 107,74 km<sup>2</sup>, bem superior quando comparada à de 1 mm, de 2,84 km<sup>2</sup>. Para depósitos acima de 10 mm, as probabilidades se limitam a uma área de 0,10 km<sup>2</sup>.

### 3.1.2. Espessura Máxima

#### 3.1.2.1. Verão

A Figura 19 apresenta a espessura máxima obtida acima de 0,01 mm para todos os casos determinísticos do verão, considerando a integração de todos os resultados.

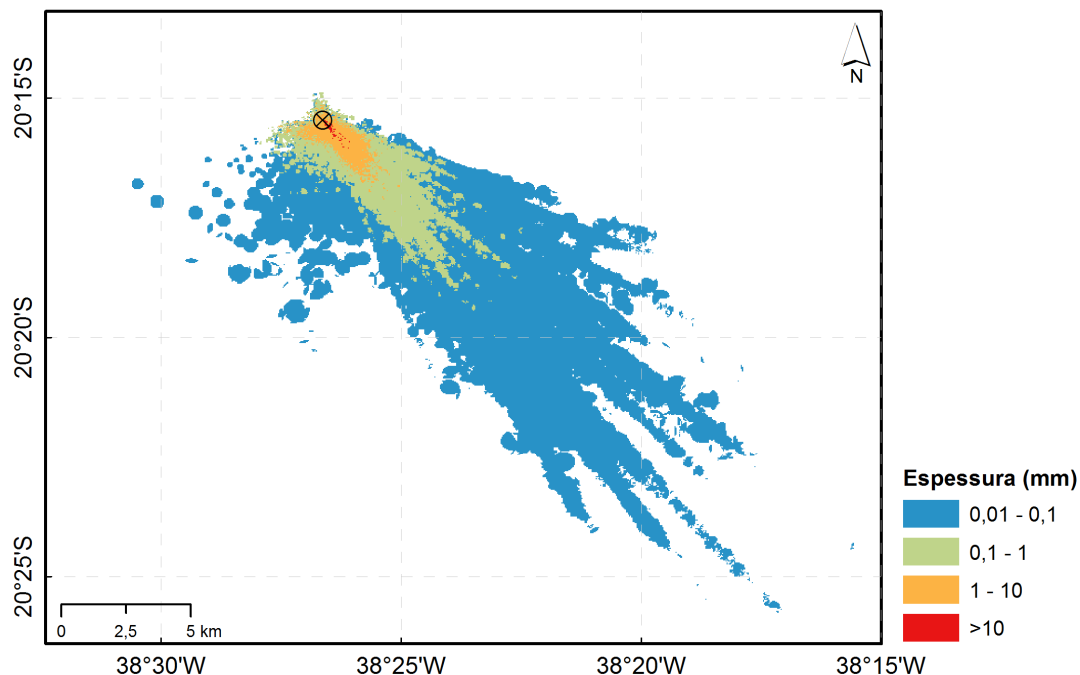


Figura 19: Mapa de espessura máxima de sólidos depositados no fundo oceânico considerando todos os casos determinísticos de verão (*Datum SIRGAS 2000*).

A Tabela 24 apresenta as distâncias máximas da fonte alcançadas em cada um dos limiares monitorados, para o cenário de verão.

Tabela 24: Distâncias máximas alcançadas para cada limiar de espessura adotado (0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm). Cenário de verão.

<b>Espessura</b>	<b>Distância máxima da fonte (km)</b>
>= 0,01	25,34
>= 0,1	10,37
>= 1	4,37
>= 10	1,41

A distância máxima observada para espessuras acima de 0,01 mm foi de 25,34 km, contrastando com a distância obtida para o limiar de 1 mm, que foi de 4,37 km. Espessuras acima de 10 mm são observadas até 1,41 km.

As grandes distâncias observadas nesse estudo são o reflexo direto do projeto de poço apresentado. Apesar de serem 8 seções perfuradas, há o descarte de fluido excedente em 4 delas, sendo um desses descartes, o da seção III, com um volume muito alto (6.000 m<sup>3</sup>), e ainda 4 seções com *riser* utilizando fluido de base sintética. Essa combinação fez com que a pilha de deposição ficasse mais espessa a uma maior distância da fonte.

A Tabela 25 apresenta as espessuras máximas obtidas a determinadas distâncias da fonte (origem, 100, 500 e 1.000 m). A espessura máxima observada nesse cenário é de 778,43 mm, identificada muito próximo da fonte. A 1 km do ponto de descarte, a máxima obtida foi de 13,73 mm.

Tabela 25: Espessuras máximas obtidas a 0, 100, 500 e 1.000 m de distância da fonte. Cenário de verão.

<b>Distância da Fonte (m)</b>	<b>Espessura Máxima (mm)</b>
0	778,43
100	27,21
500	21,05
1.000	13,73

### 3.1.2.1.1 Inverno

A Figura 20 apresenta a espessura máxima obtida acima de 0,01 mm para todos os casos determinísticos do inverno, considerando a integração de todos os resultados.

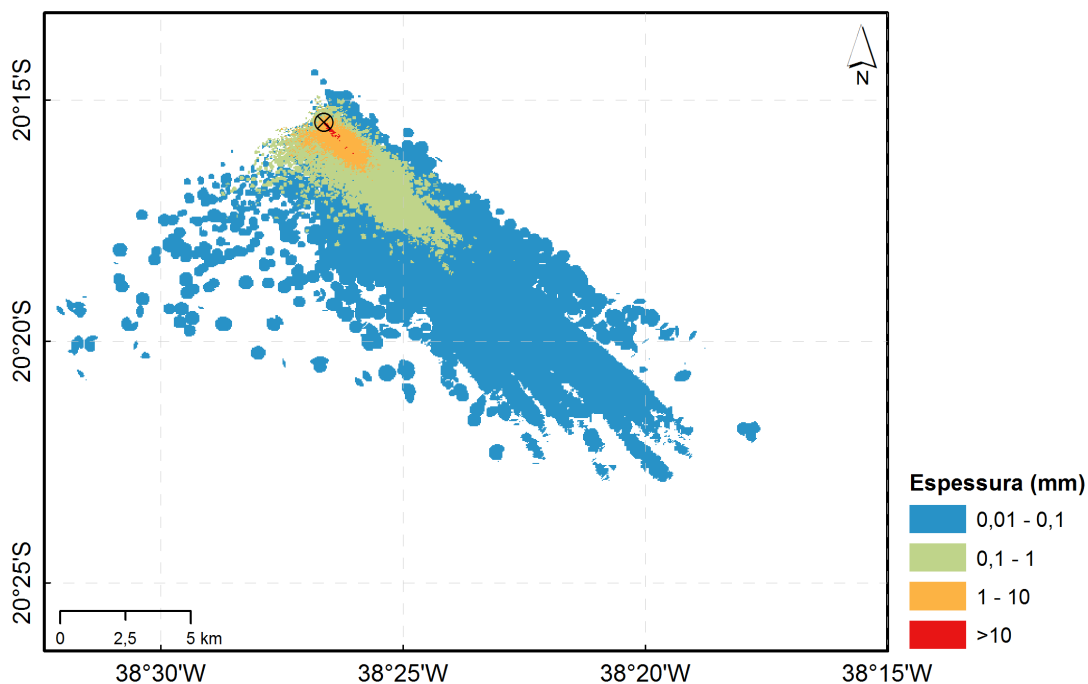


Figura 20: Mapa de espessura máxima de sólidos depositados no fundo oceânico considerando todos os casos determinísticos de inverno (*Datum* SIRGAS 2000).

A Tabela 26 apresenta as distâncias máximas da fonte alcançadas em cada um dos limiares monitorados, para o cenário de inverno.

Espessuras acima de 0,01 mm são alcançadas até 19,67 km de distância da fonte, e acima de 10 mm, até 1,58 km. Em comparação com o cenário de verão, espessuras acima de 10 mm foram registradas a uma maior distância da fonte no inverno; os outros limiares foram todos observados mais perto da fonte.

Tabela 26: Distâncias máximas alcançadas para cada limiar de espessura adotado (0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm). Cenário de inverno.

Espessura	Distância Máxima da Fonte (km)
$\geq 0,01$	19,67
$\geq 0,1$	8,63
$\geq 1$	2,81
$\geq 10$	1,58

A Tabela 27 apresenta as espessuras máximas obtidas a determinadas distâncias da fonte (origem, 100, 500 e 1.000 m). A espessura máxima obtida neste cenário, de 772,09 mm, foi ligeiramente inferior à observada no cenário de verão.

Tabela 27: Espessuras máximas obtidas a 0, 100, 500 e 1.000 m de distância da fonte. Cenário de inverno.

<b>Distância da Fonte (m)</b>	<b>Espessura Máxima (mm)</b>
0	772,09
100	27,68
500	16,14
1.000	8,46

### 3.2. Resultados Determinísticos

Dentre todos os resultados probabilísticos obtidos, foram selecionados aqueles que refletiram os piores cenários possíveis em relação à espessura máxima dos depósitos no fundo e à distância máxima da fonte dos depósitos no fundo, independente do cenário sazonal. Dessa forma, serão apresentados dois casos determinísticos.

Os resultados serão apresentados com enfoque nos impactos que o material descartado pode causar no fundo oceânico e na coluna d'água.

As pilhas de deposição serão apresentadas da seguinte forma:

- » Integração das seções sem *riser*;
- » Integração das seções com *riser*;
- » Integração de todas as seções.

Para a apresentação destes resultados, foi escolhido o limiar de 0,01 mm, como justificado no item 2.3.5.1 (Limiar de Monitoramento – Pilhas de Deposição).

O impacto do material descartado na coluna d'água será apresentado através da concentração máxima de sólidos que permanece na água durante e após o descarte. Os resultados serão apresentados considerando todos os descartes realizados. O limiar monitorado foi de 5 ppm, como explicado no item 2.3.5.2 (Limiar de Monitoramento – Sólidos em Suspensão).

Com o objetivo de determinar a área de influência da pluma de sólidos em suspensão, foi extraída a concentração máxima que a pluma pode obter para cada ponto de grade, analisando todos os tempos de simulação. Ou seja, 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.

Cabe ressaltar que, apesar desta análise ser ideal para a obtenção da área potencialmente impactada pela atividade e de resultados como concentração e distância máxima alcançada, esta não retrata o comportamento da pluma em determinados instantes. Para tal, serão

apresentados instantâneos da concentração dos sólidos na coluna d'água para alguns períodos após o início do descarte.

A Tabela 28 apresenta os períodos de simulação selecionados para cada caso determinístico. Ambos os casos selecionados estão contidos dentro do período de verão (janeiro a junho).

Tabela 28: Data inicial e final da simulação obtidas para os dois casos determinísticos selecionados.

<b>Cenário Determinístico</b>	<b>Início</b>	<b>Fim</b>
Espessura Máxima	06-mai-2010	29-mai-2010
Distância Máxima	25-fev-2010	20-mar-2010

A Figura 21 e a Figura 22 apresentam as rosas de correntes limitadas a esses períodos (respectivamente espessura e distância máxima).

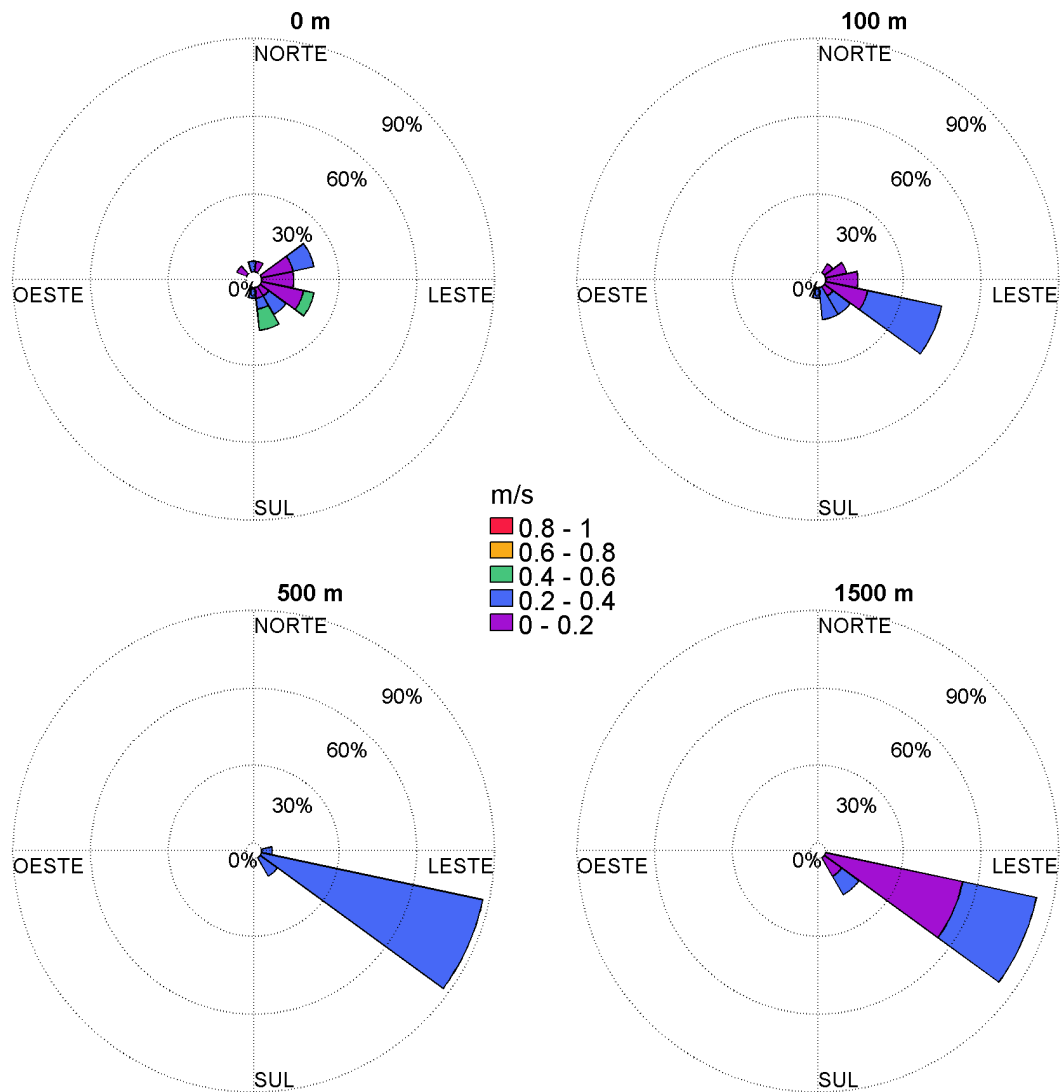


Figura 21: Histogramas direcionais de corrente nas profundidades de 0, 100, 500 e 1.500 metros, para o período representativo do cenário determinístico de espessura máxima, do ponto de grade do HYCOM mais próximo ao poço 598-B.

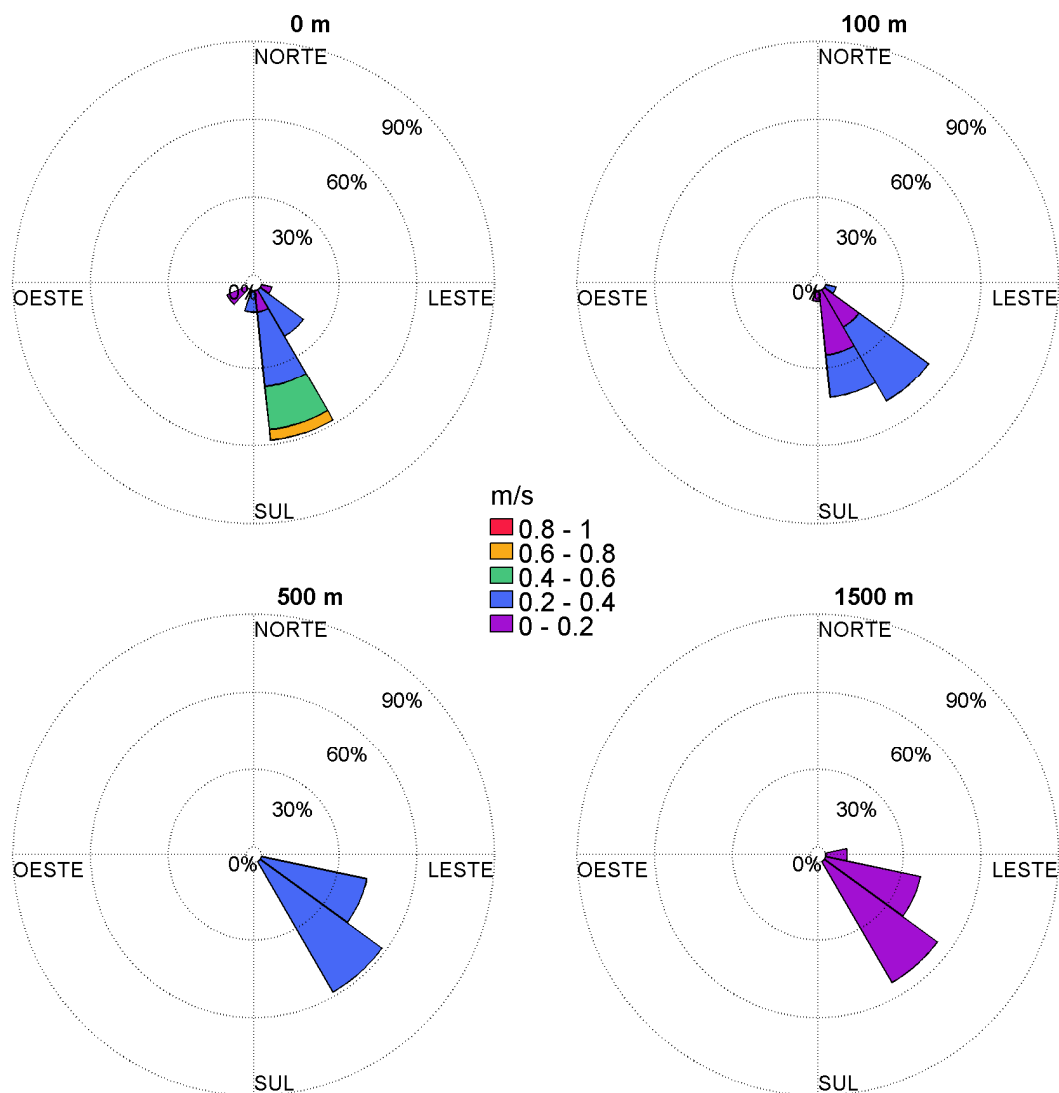


Figura 22: Histogramas direcionais de corrente nas profundidades de 0, 100, 500 e 1.500 metros, para o período representativo do cenário determinístico de distância máxima, do ponto de grade do HYCOM mais próximo ao poço 598-B.

A seguir, são apresentados os resultados obtidos para as pilhas de deposição e para as plumas de sólidos em suspensão para cada um desses cenários determinísticos.

### 3.2.1. Pilhas de Deposição

#### 3.2.1.1. Espessura Máxima

A seguir, serão apresentados os resultados para o caso determinístico que obteve o maior valor de espessura. A integração das seções sem e com *riser* são apresentadas na Figura 23.



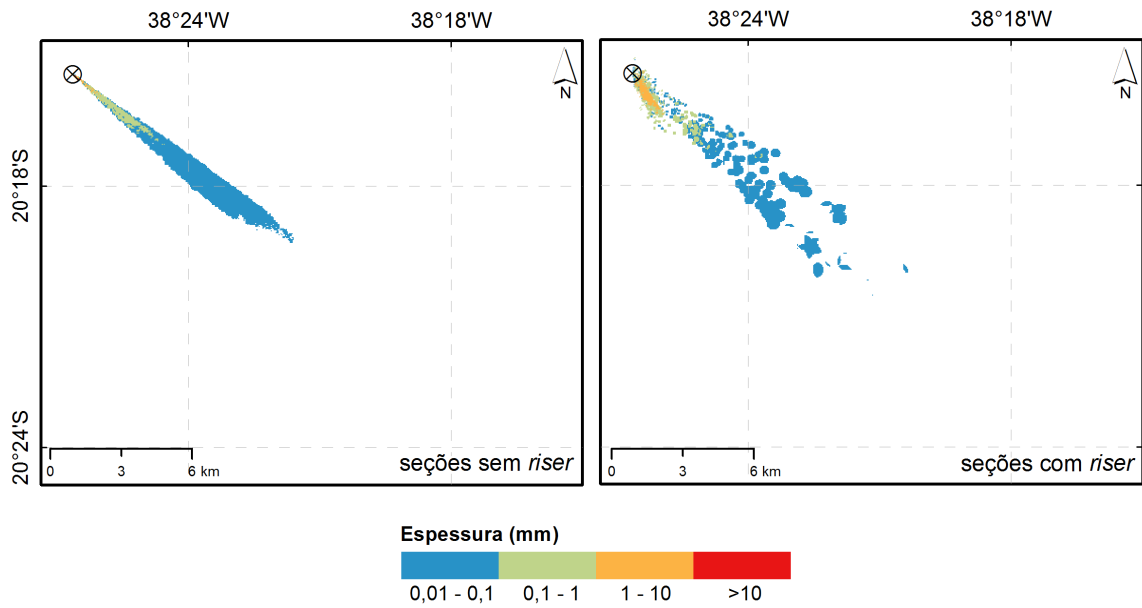


Figura 23: Pilha resultante da integração das seções sem riser e com riser. Caso determinístico – espessura máxima (Datum SIRGAS 2000).

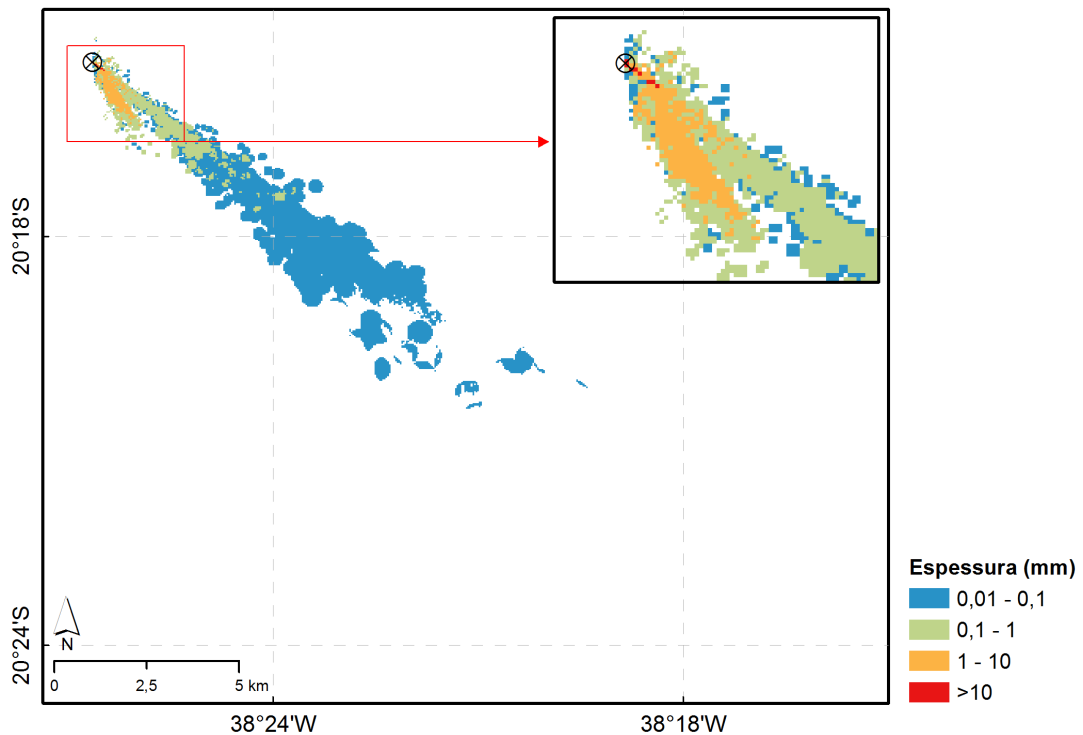


Figura 24: Pilha resultante da integração de todas as seções. Caso determinístico – espessura máxima (Datum SIRGAS 2000).

A Tabela 29 apresenta um resumo dos resultados obtidos para este cenário.

Tabela 29: Espessura máxima, área e distância máxima da fonte alcançada pelas pilhas de deposição. Caso determinístico – espessura máxima.

Descarte	Espessura máxima (mm)	Área (km <sup>2</sup> )	Distância máx. da fonte (km)
Integração - seções sem <i>riser</i>	778,35	7,97	11,23
Integração - seções com <i>riser</i>	9,12	10,46	13,75
Integração - todas as seções	778,43	15,62	15,31

Para este caso determinístico, e assim como já observado nos mapas de probabilidade, o acúmulo de material no fundo ocorre para sudeste, com maior espalhamento nas seções com *riser*. As seções sem *riser* são as responsáveis pelas maiores espessuras (779,35 mm) e as com *riser* pela maior área (10,46 km<sup>2</sup>) e distância da fonte (13,75 km). Esse comportamento das seções com *riser* é explicado pelo descarte da seção IV, pois é utilizado fluido de perfuração de base aquosa.

A espessura máxima alcançada pela integração de todos os descartes foi de 778,43 mm, ocupando uma área de 15,62 km<sup>2</sup> e atingindo uma distância de 15,31 km do ponto de descarte, considerando o limiar 0,01 mm. Acima de 1 mm, a área impactada reduz significativamente para 0,53 km<sup>2</sup> (Tabela 30).

Na Tabela 30, é apresentado um resumo da área encontrada na pilha de integração total acima de algumas espessuras definidas.

Tabela 30: Resumo da área encontrada para cada limiar de espessura adotado (0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm). Caso determinístico – espessura máxima.

Espessura (mm)	Área (km <sup>2</sup> )
>= 0,01	15,62
>= 0,1	2,94
>= 1	0,53
>= 10	0,013

### 3.2.1.2. Distância Máxima

A seguir, serão apresentados os resultados para o caso determinístico que obteve a maior distância em relação à fonte. A integração das seções sem e com *riser* são apresentadas na Figura 25. A pilha resultante da integração de todos os descartes é apresentada na Figura 26.

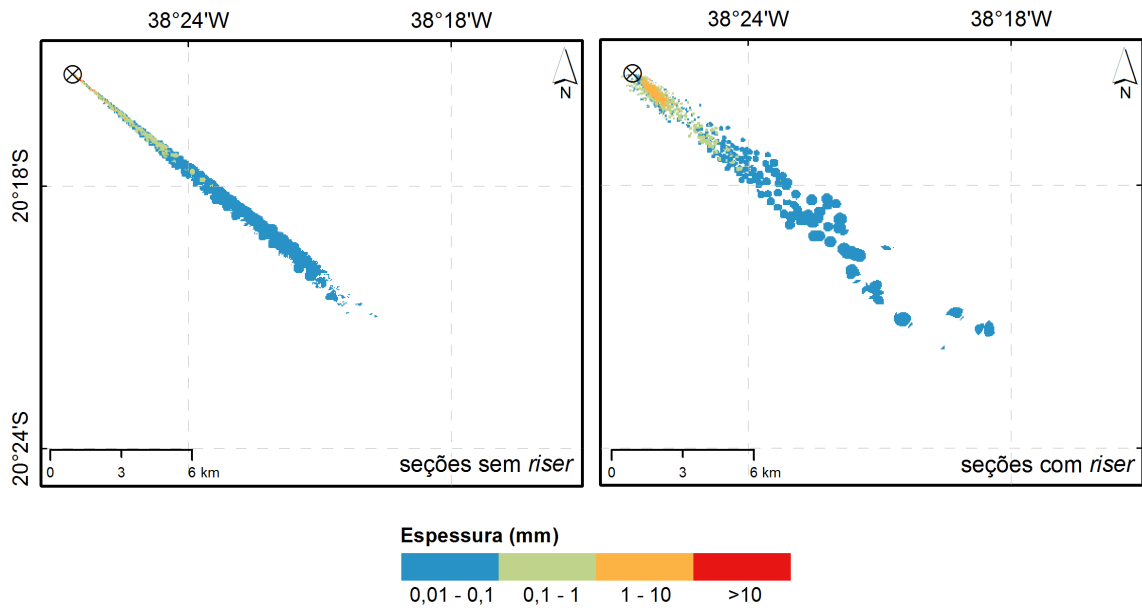


Figura 25: Pilha resultante da integração das seções sem *riser* e com *riser*. Caso determinístico – distância máxima (*Datum* SIRGAS 2000).

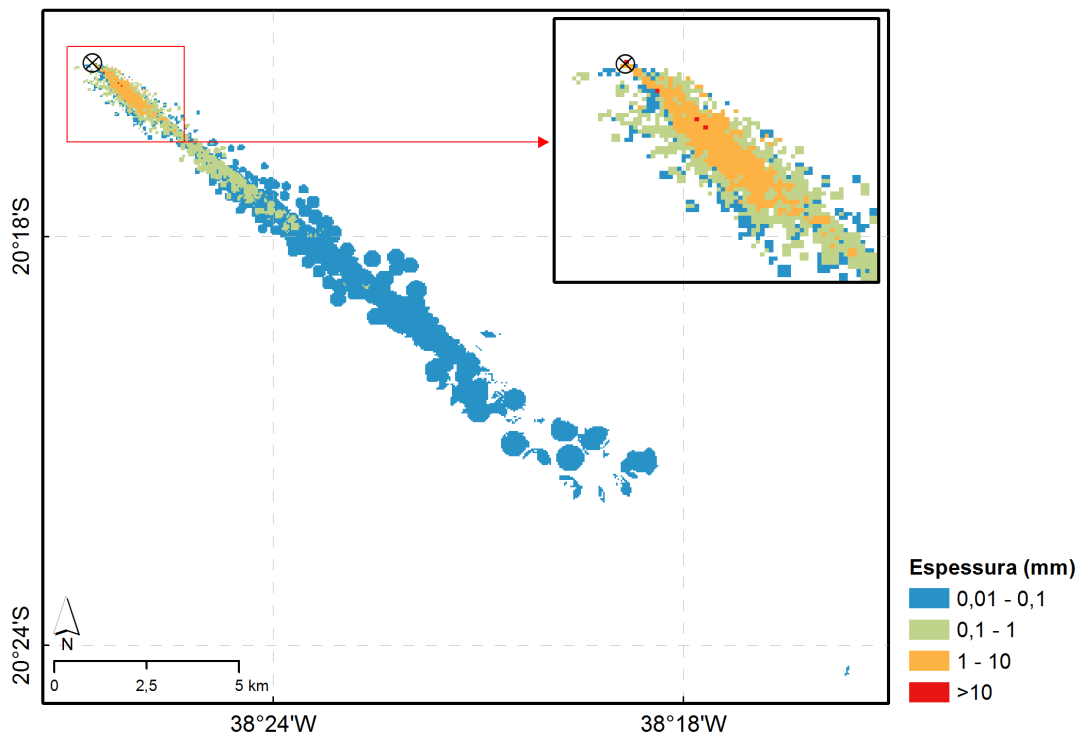


Figura 26: Pilha resultante da integração de todas as seções. Caso determinístico – distância máxima (*Datum* SIRGAS 2000).

Um resumo dos resultados obtidos para este cenário é apresentado na Tabela 31.

Tabela 31: Espessura máxima, área e distância máxima da fonte alcançada pelas pilhas de deposição. Caso determinístico – distância máxima.

Descarte	Espessura Máxima (mm)	Área (km <sup>2</sup> )	Distância máx. da fonte (km)
Integração - seções sem <i>riser</i>	745,24	6,95	15,83
Integração - seções com <i>riser</i>	8,99	12,07	18,01
Integração - todas as seções	745,24	16,36	25,34

Neste caso, também é observado o acúmulo da pilha de deposição para sudeste, seguindo a hidrodinâmica local. A maior espessura (745,24 mm) é registrada na integração das seções sem *riser*, enquanto a distância máxima (18,01 km) e a área (12,07 km<sup>2</sup>) são maiores para as seções com *riser*.

A espessura máxima alcançada pela integração de todos os descartes foi de 745,24 mm, ocupando uma área de 16,36 km<sup>2</sup> e atingindo 25,34 km do ponto de descarte, considerando o limiar de 0,01 mm. Acima de 1 mm, a área impactada reduz significativamente para 0,58 km<sup>2</sup> (Tabela 32).

Na Tabela 32, é apresentado um resumo da área encontrada acima de algumas espessuras determinadas na pilha de integração total.

Tabela 32: Resumo da área encontrada para cada limiar de espessura adotado (0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm). Caso determinístico – distância máxima.

Espessura (mm)	Área (km <sup>2</sup> )
>= 0,01	16,36
>= 0,1	3,00
>= 1	0,58
>= 10	0,006

## 3.2.2. Sólidos em Suspensão

### 3.2.2.1. Espessura Máxima

A Figura 27 e a Figura 28 apresentam a concentração máxima de sólidos em suspensão, considerando todo o período de simulação. O mapa em planta é o mesmo em ambas as figuras, diferindo entre elas somente o perfil que foi extraído.

É importante ressaltar que esse resultado não corresponde a um instantâneo, mas sim à integração no tempo de todos os resultados. O objetivo desta análise é determinar a área impactada e quais foram as concentrações máximas e distâncias máximas da fonte obtidas durante toda a simulação.

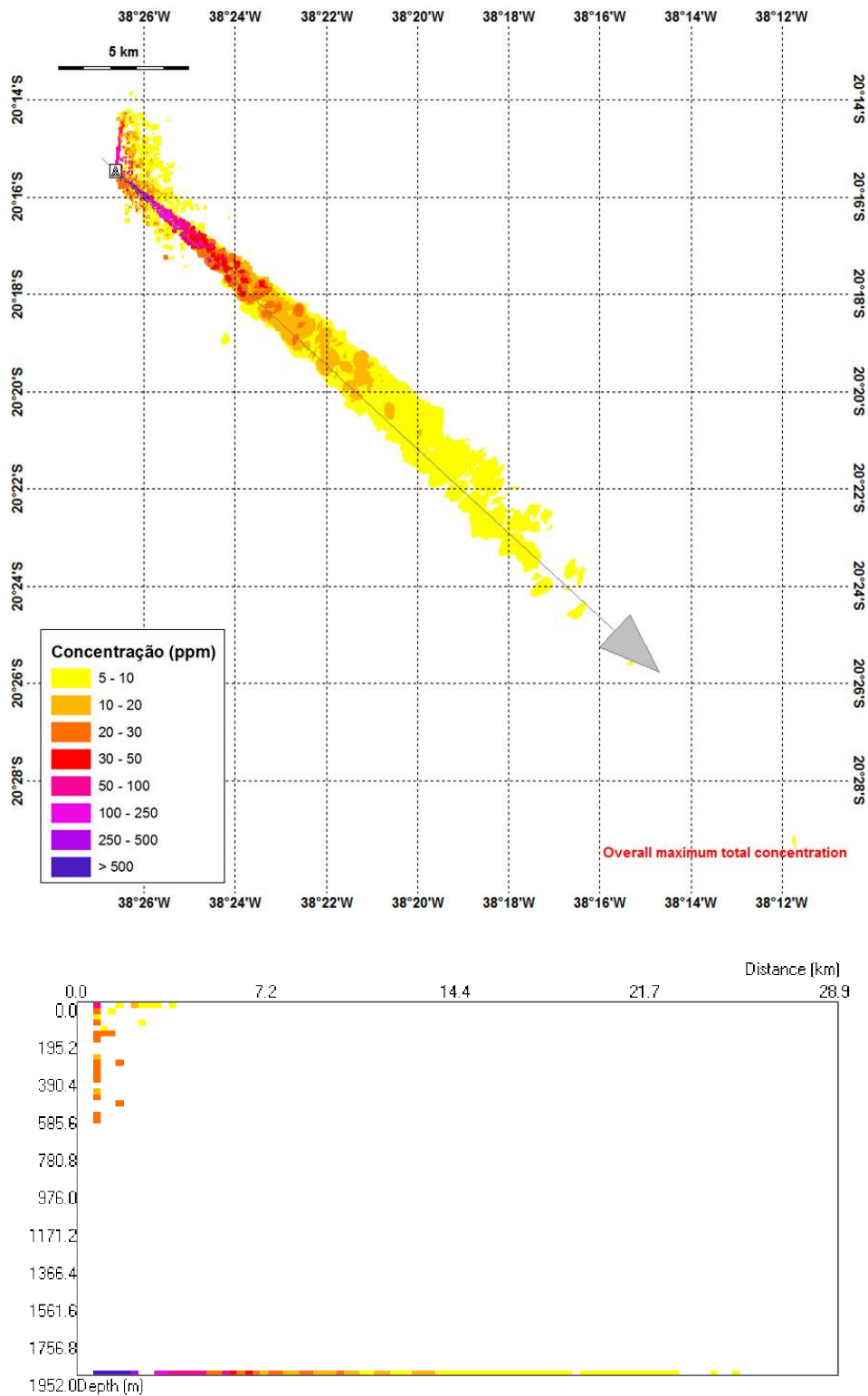


Figura 27: Concentração máxima de sólidos na coluna d'água considerando todo o período de simulação e todos os descartes: visão em planta (painel superior) e em perfil com orientação NW-SE (painel inferior). Caso determinístico – espessura máxima (*Datum* SIRGAS 2000).

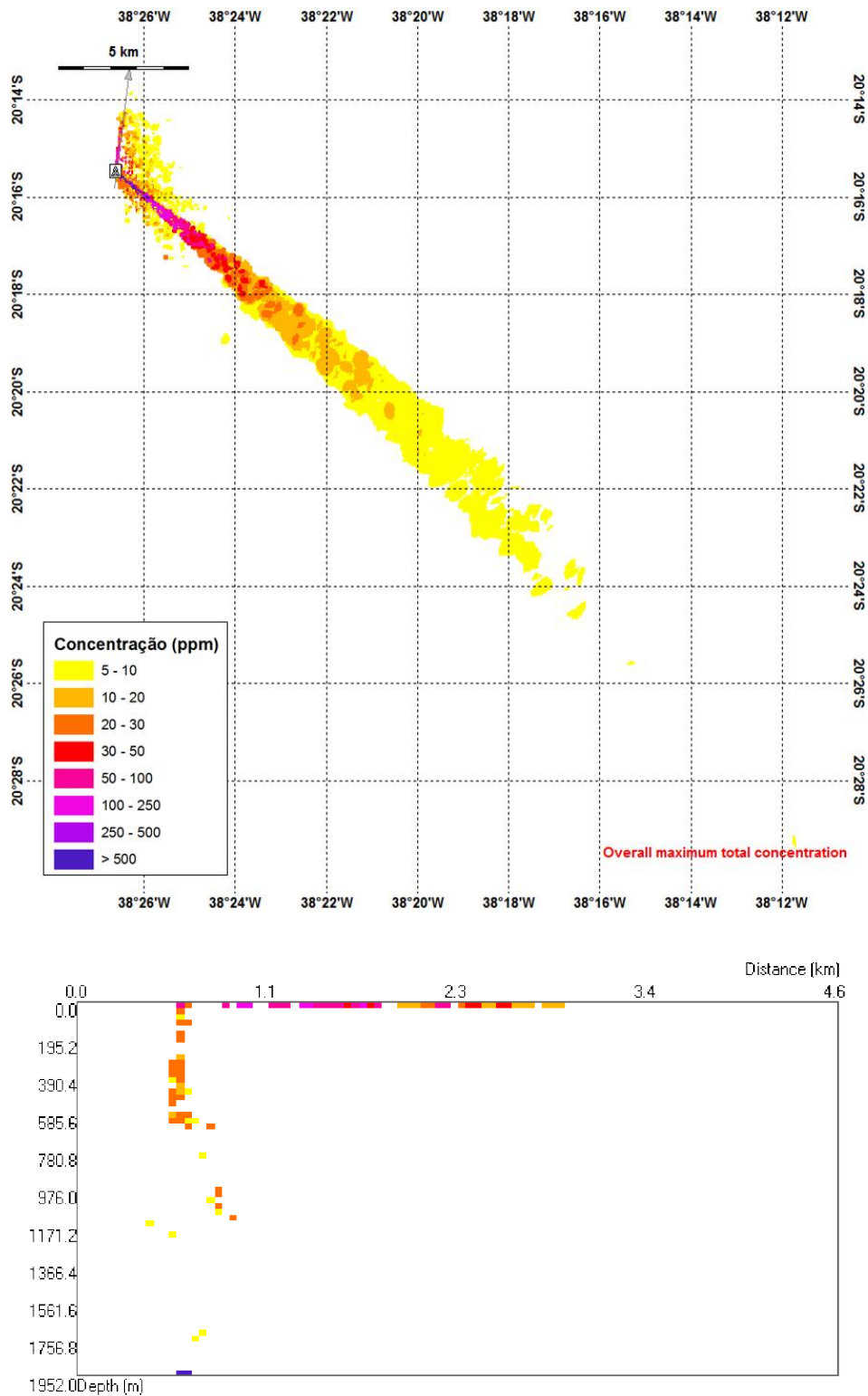


Figura 28: Concentração máxima de sólidos na coluna d'água considerando todo o período de simulação e todos os descartes: visão em planta (painel superior) e em perfil com orientação SW-NE (painel inferior). Caso determinístico – espessura máxima (*Datum* SIRGAS 2000).

Na Figura 29 e na Figura 30 são apresentados instantâneos da concentração dos sólidos na coluna d'água para 2 dias e 9 horas e 6 dias e 12 horas, respectivamente, após o início do descarte.

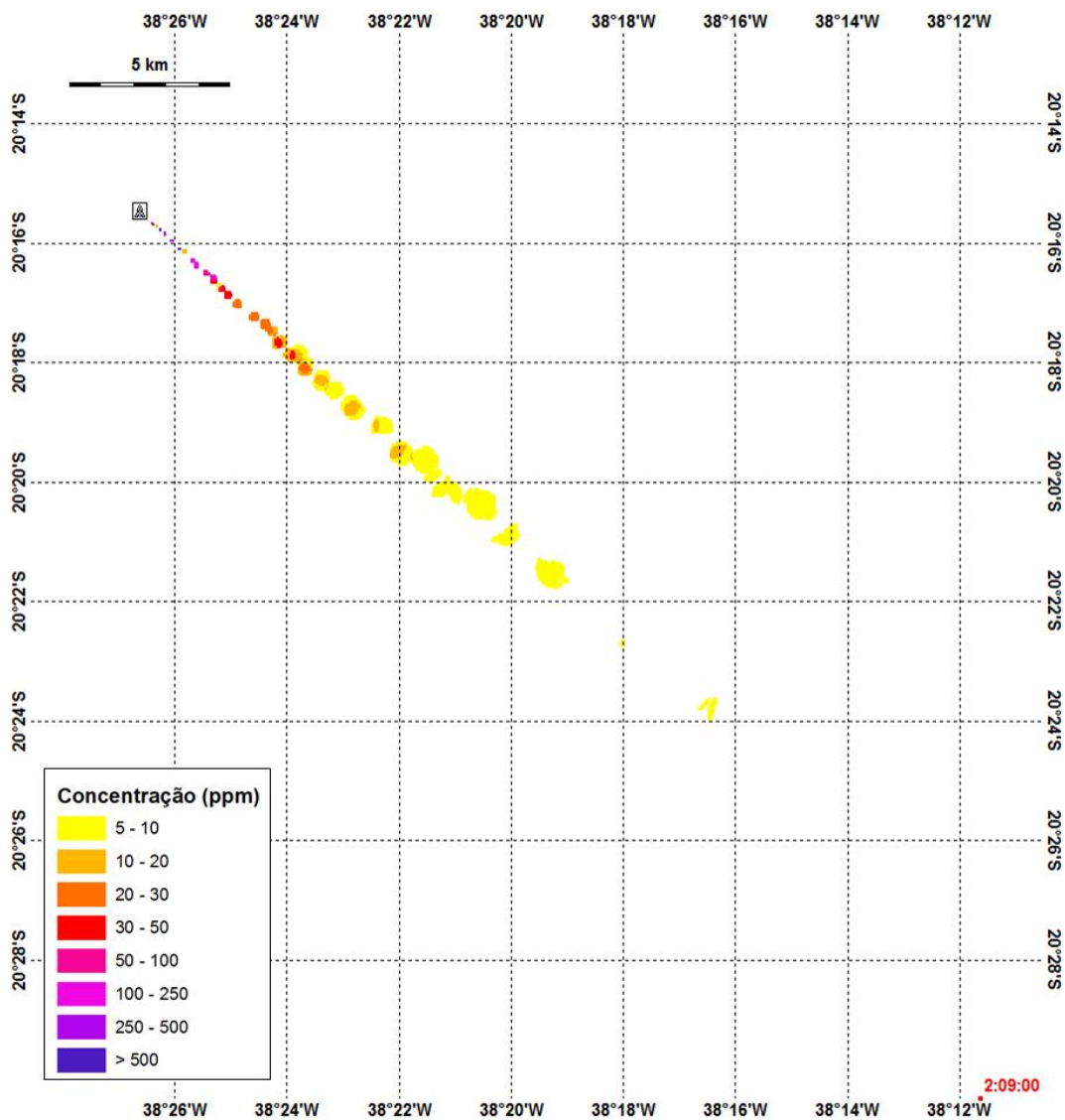


Figura 29: Visão em planta da concentração de sólidos na coluna d'água após 2 dias e 9 horas do início do descarte: visão em planta. Caso determinístico – espessura máxima (*Datum* SIRGAS 2000).

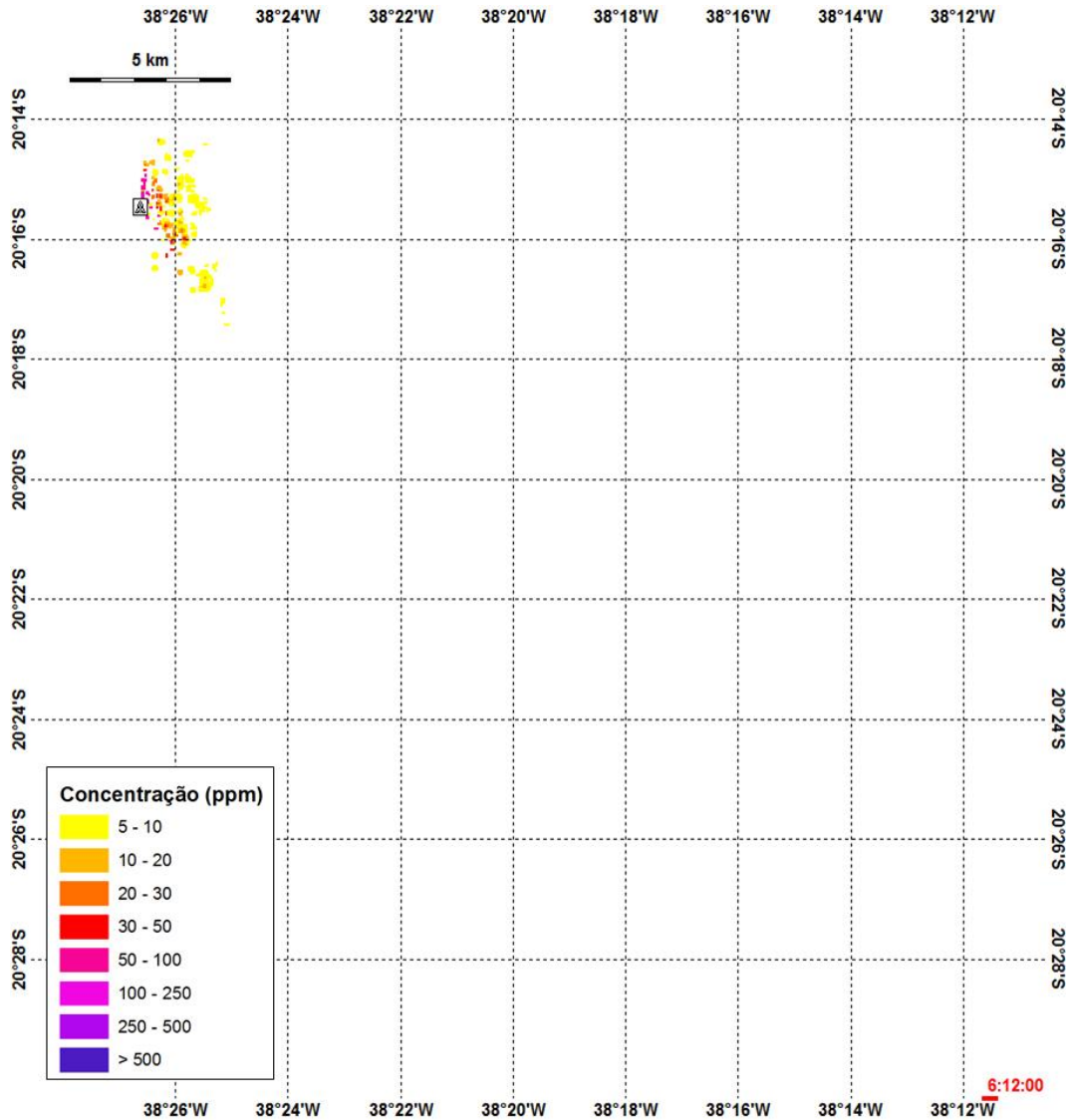


Figura 30: Visão em planta da concentração de sólidos na coluna d'água após 6 dias e 12 horas do início do descarte: visão em planta. Caso determinístico – espessura máxima (*Datum* SIRGAS 2000).

A seguir, na Tabela 33, são apresentados os valores máximos de concentração de sólidos em suspensão, distância da fonte e tempo de permanência dos sólidos na coluna d'água, acima do limiar monitorado, após o fim da simulação.

Tabela 33: Concentração máxima, distância máxima da fonte e tempo de permanência para as plumas de sólidos em suspensão. Caso determinístico – espessura máxima.

Parâmetros	Valores
Concentração Máxima (ppm)	726,6
Distância Máxima da Fonte (km)	36,49
Tempo de Permanência (h)	< 2



Os resultados obtidos mostram que os descartes das seções sem *riser* são os principais responsáveis pelas elevadas concentrações de sólidos em suspensão, sendo estas limitadas ao fundo. Em menores profundidades, não são observadas concentrações superiores a 100 ppm.

A concentração máxima observada foi de 726,6 ppm e a pluma alcançou até 36,49 km do ponto de descarte. Após 2 h do término do descarte, já não são mais observadas concentrações acima do limiar monitorado.

A Tabela 34 apresenta as distâncias máximas alcançadas para várias classes de concentração.

Tabela 34: Distâncias máximas alcançadas para alguns limiares de concentração. Caso determinístico – espessura máxima.

<b>Concentração (ppm)</b>	<b>Distância (km)</b>
>= 5	36,5
>= 10	16,1
>= 20	9,6
>= 30	7,4
>= 50	5,8
>= 100	3,7
>= 250	2,4
>= 500	1,8

### 3.2.2.2. Distância Máxima

A Figura 31 apresenta a concentração máxima de sólidos em suspensão, considerando todo o período de simulação.

É importante ressaltar que esse resultado não corresponde a um instantâneo, mas sim à integração no tempo de todos os resultados. O objetivo desta análise é determinar a área impactada e quais foram as concentrações máximas e distâncias máximas da fonte obtidas durante toda a simulação.

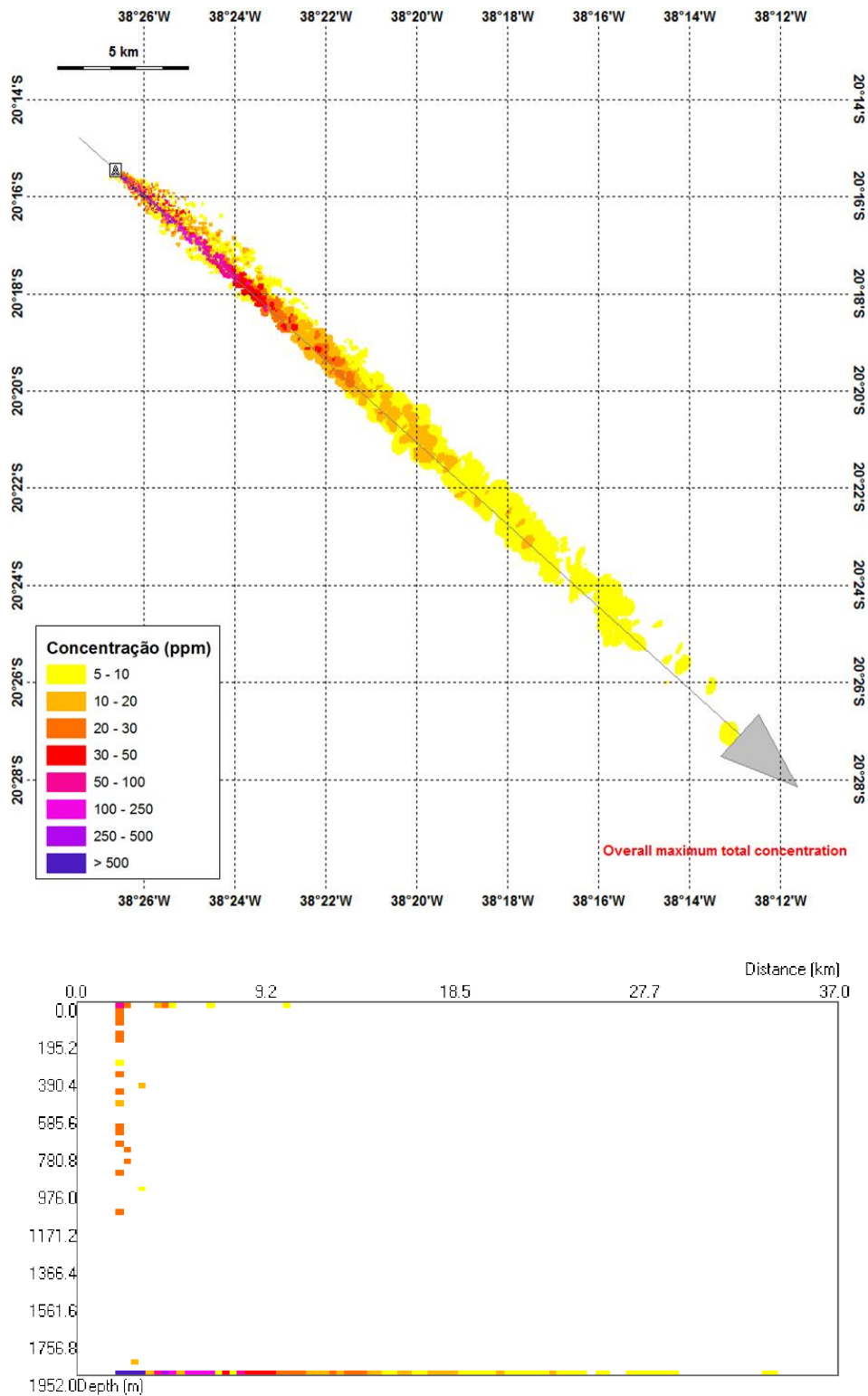


Figura 31: Concentração máxima de sólidos na coluna d'água considerando todo o período de simulação e todos os descartes: visão em planta (painel superior) e em perfil com orientação NW-SE (painel inferior). Caso determinístico – distância máxima (*Datum* SIRGAS 2000).

Na Figura 32 e na Figura 33 são apresentados instantâneos da concentração dos sólidos na coluna d'água para 1 dia e 12 horas e 6 dias e 12 horas, respectivamente, após o início do descarte.

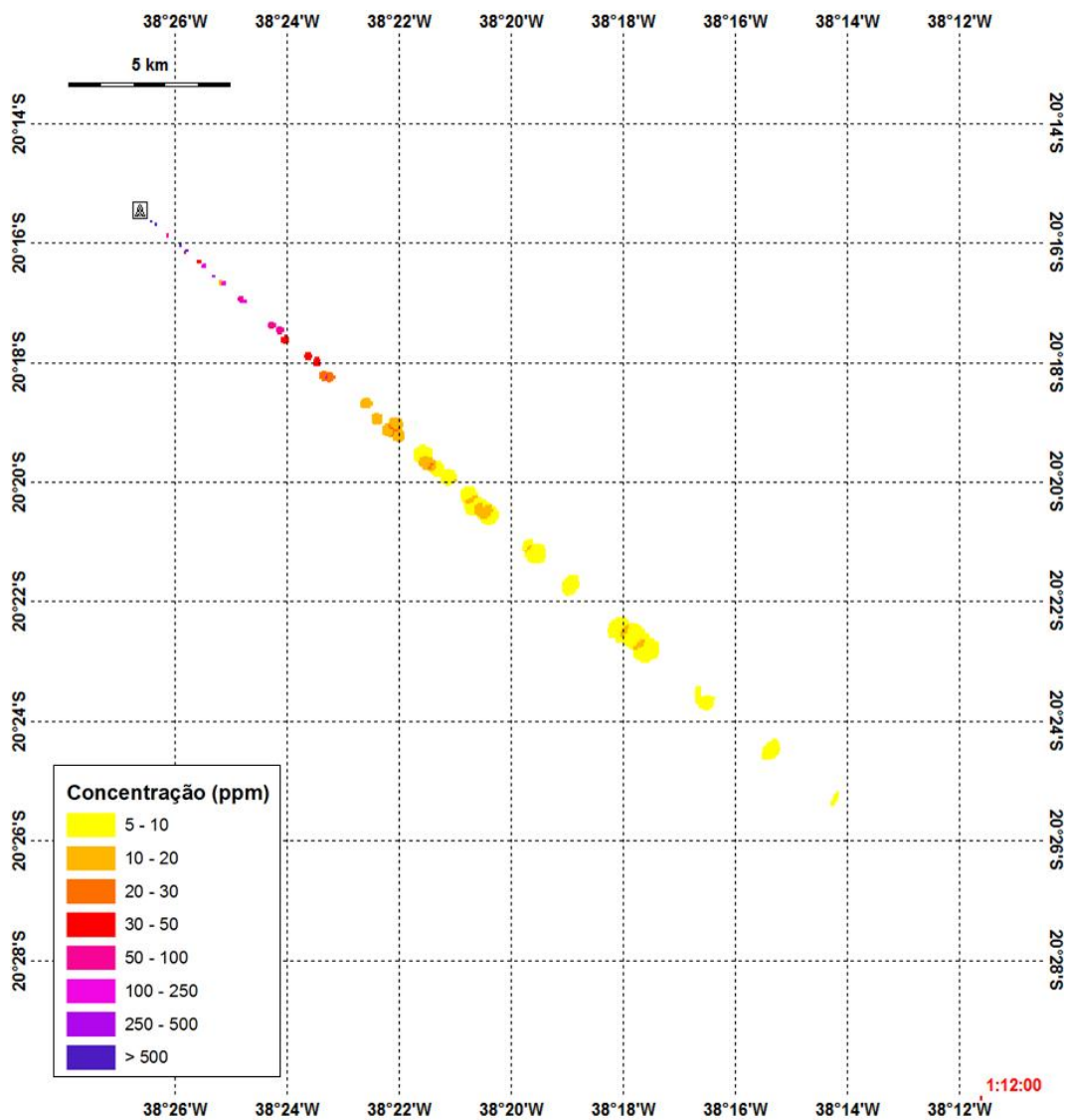


Figura 32: Visão em planta da concentração de sólidos na coluna d'água após 1 dia e 12 horas do início do descarte: visão em planta. Caso determinístico – distância máxima (*Datum* SIRGAS 2000).

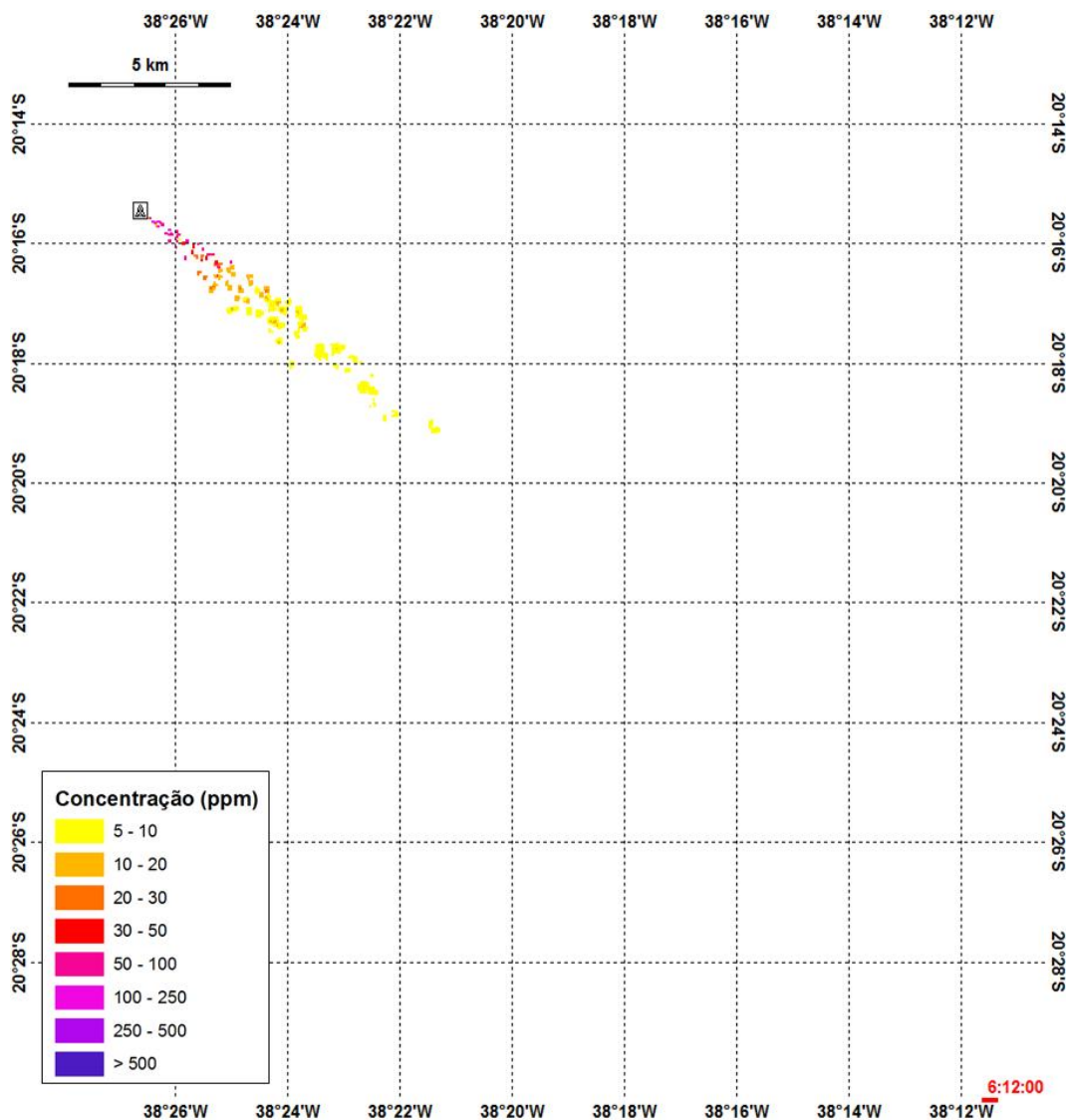


Figura 33: Visão em planta da concentração de sólidos na coluna d'água após 6 dias e 12 horas do início do descarte: visão em planta. Caso determinístico – distância máxima (*Datum* SIRGAS 2000).

A seguir, na Tabela 35, são apresentados os valores máximos de concentração de sólidos em suspensão, distância da fonte e tempo de permanência dos sólidos com concentrações acima do limiar monitorado.

Tabela 35: Concentração máxima, distância máxima da fonte e tempo de permanência para as plumas de sólidos em suspensão. Caso determinístico – distância máxima.

Parâmetros	Valores
Concentração Máxima (ppm)	830,5
Distância Máxima da Fonte (km)	32,21
Tempo de Permanência (h)	< 2

A exemplo do observado para os demais cenários, os resultados mostram que os descartes das seções sem *riser* são os principais responsáveis pelas elevadas concentrações de sólidos em suspensão, sendo estas limitadas ao fundo. Em menores profundidades, não são observadas concentrações superiores a 50 ppm.

A concentração máxima observada foi de 830,5 ppm, com a pluma chegando a 32,21 km do ponto de descarte. Após 2 h do término do descarte, já não são mais observadas concentrações acima do limiar monitorado.

A Tabela 36 apresenta as distâncias máximas alcançadas para algumas classes de concentração.

Tabela 36: Distâncias máximas alcançadas para alguns limiares de concentração. Caso determinístico – distância máxima.

<b>Concentração (ppm)</b>	<b>Distância (km)</b>
>= 5	32,2
>= 10	21,9
>= 20	13,9
>= 30	11,8
>= 50	8,7
>= 100	5,9
>= 250	3,0
>= 500	2,7

## 4. Conclusão

Simulações numéricas foram realizadas para determinar o comportamento físico do material a ser descartado durante a atividade de perfuração pela Statoil no Bloco EM-S-598, Bacia do Espírito Santo. Os resultados foram analisados de modo a identificar os potenciais impactos da atividade no assoalho oceânico e na coluna d'água.

O projeto de poço analisado prevê a perfuração do poço em 8 (oito) seções, com previsão de descarte de fluido excedente das seções I a IV. Nas três primeiras seções (fases sem *riser*), o descarte ocorrerá próximo ao fundo e o fluido de perfuração utilizado será de base água. Das seções IV a VIII (fases com *riser*), o descarte ocorrerá próximo à superfície e será utilizado um fluido de base água na seção IV e sintético nas demais.

As simulações foram realizadas a partir do modelo numérico DREAM (*Dose-related Risk and Exposure Assessment Model*), desenvolvido pela SINTEF para estimar o comportamento e o destino de diversos tipos de efluente (incluindo cascalhos e fluidos de perfuração) no ambiente marinho.

Para atingir o objetivo do estudo, foram realizadas simulações probabilísticas e determinísticas. Nos resultados probabilísticos, foi considerado um ano de dados de correntes gerados pelo modelo hidrodinâmico HYCOM e, para este período, foi feita a separação em verão (janeiro a junho) e inverno (julho a dezembro). No total, foram utilizadas 66 simulações determinísticas distintas para o cálculo da probabilidade.

Dentre todas as simulações determinísticas geradas, foram selecionadas aquelas em que foram obtidos os maiores valores de espessura e distância da fonte dos depósitos no fundo, independente do cenário sazonal. Para estes dois casos determinísticos também foram apresentadas as concentrações dos sólidos em suspensão.

Para as simulações foi necessária a criação de duas grades distintas para cada ponto, uma que abrangesse toda a área impactada pelas pilhas de deposição, considerando o limiar de 0,01 mm, e outra, com domínio maior e menor refinamento, para a apresentação dos resultados dos sólidos em suspensão, considerando o limiar de 5 ppm.

De maneira geral, todos os casos simulados apresentaram resultados muito similares, com maior área de deposição para sudeste e menor área para sul do ponto de descarte. Isso ocorre devido à similaridade das correntes atuantes entre os cenários sazonais. A porção de sólidos acumulada à sudeste da origem é constituída tanto pelas seções descartadas do fundo quanto da superfície, e a porção depositada ao sul da origem, é constituída, basicamente, pelas seções descartadas da superfície.

Em relação aos resultados probabilísticos, o verão foi o cenário que apresentou a maior distância da fonte (25,34 km) e a maior espessura de depósito no fundo (778,43 mm). Para o inverno, é prevista uma área de 107,74 km<sup>2</sup> com probabilidades de presença dos sólidos depositados acima de 0,01 mm de espessura. Essa área é de 118,81 km<sup>2</sup> para o cenário de verão. Ao se considerar o limiar de 1 mm, os valores de área passam para 2,84 km<sup>2</sup> (inverno) e 3,24 km<sup>2</sup> (verão).

Pela análise dos casos determinísticos selecionados, verificou-se que as seções descartadas da superfície (com *riser*) com a utilização do fluido de base sintética são as que se depositam mais rapidamente (item 2.3.2), por conta das maiores densidades do fluido aderido e pela presença de classes granulométricas mais grosseiras em sua composição.

Analisando os resultados dos sólidos em suspensão obtidos para os dois casos determinísticos, nota-se que, seguindo a tendência das correntes, há predominância de concentrações acima de 5 ppm para sudeste, com uma ocorrência limitada e de baixas concentrações para nordeste, no caso do cenário de espessura máxima. Dessa forma, nota-se que as seções descartadas no fundo são as que mais contribuem para os resultados de sólidos em suspensão acima de 5 ppm. A concentração máxima obtida foi de 830,5 ppm e a distância máxima foi de 36,5 km.

Ressalta-se que, 2 h após o término dos descartes, já não são mais observadas concentrações na coluna d'água acima do limiar monitorado, o que indica que as concentrações são rapidamente dispersadas no ambiente.

A partir da análise de todos os resultados apresentados, conclui-se que os resultados probabilísticos gerados deram maior robustez à modelagem, ao delimitar as áreas com maior probabilidade de serem impactadas. A escolha de cenários extremos para estimativa da área impactada é válida, mas limita a análise dos resultados a situações específicas com baixa probabilidade de ocorrência, tornando imperativo o emprego de interpretações dos resultados de forma conservadora.

## 5. Bibliografia

- ANTONOV, J. I.; D. SEIDOV; T. P. BOYER; R. A. LOCARNINI; A. V. MISHONOV; H. E. GARCIA; O. K. BARANOVA; M. M. ZWENG; D. R. JOHNSON. 2010. World Ocean Atlas 2009, Volume 2: Salinity. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 69, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 184 pp.
- BELLCHAMBERS, L.M. & A.M.M. RICHARDSON, 1995. The effect of substrate disturbance and burial depth on the venerid clam, *Katelysia scalarina* (Lamark, 1818). *J. Shellfish Res.* 14, 41-44.
- BRANDSMA, M.; SMITH, J. 1999. Offshore Operators Committee Mud and Produced Water Discharge Model - Report and User Guide. In: Relatório EPR.29PR.99. Production Operations Division. Exxon Production Research Company. Houston, Texas.
- BRANDSMA, M.G. 1993. Computer Simulations of Oily Cuttings Discharges in the North Sea. Volume 1 & 2 Project Report, Final Report Dated June 1993.
- CHASSIGNET, E. P.; SMITH, L. T.; HALLIWEL, G. R. North Atlantic simulation with the Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM): Impact of the vertical coordinate choice, reference pressure, and thermobaricity. *Journal Physical Oceanography*, v. 33, n. 12, p. 2504-2526. 2003.
- CHANDRASEKARA, W.U. & C.L.J FRID, 1998. A laboratory assessment of the survival and vertical movement of two gastropod species, *Hydrobia ulvae* (Pennant) and *Littorina littorea* Linnaeus), after burial in sediment. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 221: 1991-207.
- DAMES; MOORE. Drilling Fluid Dispersion and Biological Effects Study for the Lower Cook Inlet C.O.S.T. Well. In: Report prepared for Atlantic Richfield Company, Volume 102, Record 946 of USEPA Rulemaking Record for the Offshore Effluent Limitations Guidelines, 1978.
- GABIOUX, M. 2008. Estudo Numérico dos meandros e vórtices da corrente do Brasil entre 22°S e 30°S. Tese de (Doutorado em Ciências), Instituto de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- HYCOM. 2008. Assimilative Global Simulation, Disponível em: <<http://www.hycom.org/hycom/overview>>. Acessado em: Setembro de 2015.
- HOLTHAUS, K.I.E., J.E. TAMIS, M.G.D. SMIT, R.G. JAK, 2003. SSD approach applied to three types of Sediment Disturbances related to Drilling Discharges. TNO Report DRAFT November 2003.



- JOHANSEN, Ø. (2000): "DeepBlow – a Lagrangian Plume Model for Deep Water Blowouts".  
Spill Science & Technology Bulletin, Vol. 6, No. 2, pp 103 – 111.
- JOHANSEN, Ø.; DURGUT, I. Implementation of the near-field module in the ERMS model. In:  
ERMS Report, v.77, n.23. 2006.
- KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.;  
IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; LEETMAA, A.;  
REYNOLDS, R. The NCEP /NCAR 40-Year Reanalysis Project. Bulletin of the American  
Meteorological Society. v. 77, p. 437-470. 1996.
- KISTLER, R.; COLLINS, W.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J. The NCEP-NCAR 50 Year  
Reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. Bulletin of the American  
Meteorological Society, v. 82, pp. 247-267. 2001.
- KJEILEN-EILERTSEN, G.; TRANNUM, H.; JAK, R. G.; SMIT, M. G. D.; NEFF, J.; DURELL, G.  
Literature report on burial: derivation of PNEC as componente in the MEMW model tool.  
In: ERMS Report no. 9B. 2004.
- KOH, R. C. Y.; CHANG, Y. 1973. Mathematical Model for Barge Ocean Disposal of Wastes. In:  
Relatório EPA-6602-73-029, U.S. Environmental Protection Agency, Corvallis, Oregon.
- KRANZ, P.M. The anastrophic burial of bivalves and its paleoecological significance. Journal of  
Geology, v. 82, p. 237-265. 1974.
- LOCARNINI, R. A.; A. V. MISHONOV; J. I. ANTONOV; T. P. BOYER; H. E. GARCIA; O. K.  
BARANOVA; M. M. ZWENG; D. R. JOHNSON. 2010. World Ocean Atlas 2009, Volume 1:  
Temperature. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 68, U.S. Government Printing Office,  
Washington, D.C., 184 pp.
- MAURER, D.; KECK, R.T.; TINSMAN, J.C.; LEATHEM, W.A. Vertical migration and mortality of  
benthos in dredged material. Part I: Mollusca. Mar. Environ. Res., v. 4, p. 299-319. 1980.
- MAURER, D.; KECK, R.T.; TINSMAN, J.C.; LEATHEM, W.A. Vertical migration and mortality of  
benthos in dredged material: Part II: Crustacea. Mar. Environ. Res., v. 5, p. 301-317.  
1981.
- O'REILLY, J.E., SAUER, T.C., AYERS, R.C. JR., BRANDSMA, M.G., MEEK, R. 1989. Field  
Verification of the OOC Mud Discharge Model. In: Drilling Fluids. F.R. Engelhart, J.P. Ray,  
A.H. Gillam, Eds., Elsevier Applied Science. Nova Iorque. Pp 647-665.
- REED, M.; HETLAND, B. 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. Documentation report for the revised DREAM model. In: ERMS Report nº.18. 2006.

RYE, H.; REED, M.; FROST, T.; SMIT, M.; DURGUT, I.; JOHANSEN, O.; DITLEVSEN, M. Development of a numerical model for calculating exposure to toxic and nontoxic stressors in the water column and sediment from drilling discharges. Integrated Environmental Assessment and Management, v. 4, n. 2, pp. 194-203. 2008.

SMIT, M. G. D.; HOLTHAUS, K. I. E.; KAAG, N. B. H. M.; JAK, R. G. The derivation of a PNEC-water for weighting agents in drilling mud. EMRS Report no. 6. 2006.

TETRA TECH, 2015. Modelagem Hidrodinâmica para a Região da Bacia do Espírito Santo. Relatório Técnico, Revisão 00 (31 de julho de 2015). 60pp+Apêndice.

TOLDO, E. E. JR.; AYOUP-ZOUAIN, R. N. MAPEM – Monitoramento Ambiental em Atividades de Perfuração Exploratória Marítima, Águas Profundas, Publicação CECO-IG-UFRGS, Porto Alegre. 2004.