

a



Relatório Técnico [rev.00]

Modelagem de água produzida

BM-C-41

/PRO_AEC_1106

Preparado para: AECOM/OGX

Preparado por: Natalia Gomes / Ana Boechat

27 de julho de 2011

Prooceano

Av. Rio Branco, 311/1205 – Centro

CEP 20.0040-009 – Rio de Janeiro – RJ

Tel./Fax + 55 21 2532.5666

www.prooceano.com.br

Controle de revisão

Revisão nº 00

Data: 27/07/2011

Descrição: Relatório Original

Responsável: Bruna Cerrone

Empresa: PROOCEANO

Revisão nº 01

Data:

Descrição:

Responsável:

Empresa: PROOCEANO

Revisão nº 02

Data:

Descrição:

Responsável:

Empresa:

Revisão nº 03

Data:

Descrição:

Responsável:

Empresa:

Sumário

1. Introdução	12
2. Descrição da atividade.....	13
3. Características meteo-oceanográficas da região.....	15
3.1. Vento e temperatura do ar	15
3.2. Base hidrodinâmica utilizada.....	21
3.2.1 Descrição do modelo	21
3.2.2 Equações Governantes.....	23
3.3. Corrente, temperatura e salinidade.....	25
3.3.1 Cenário de Verão	26
3.3.2 Cenário de Inverno.....	30
3.4. Ondas.....	34
4. Metodologia.....	36
4.1. Modelo de transporte	36
4.1.1 Descrição do Modelo	36
4.1.2 Equações Governantes.....	37
4.1.3 Variáveis ambientais	40
4.2. Estratégias de modelagem.....	41
4.2.1 Concentração e fator de diluição	41
4.2.2 Representação de descartes contínuos.....	41
5. Resultados	44
5.1. Fase Dinâmica	44
5.1.1 Posição da Pluma na Coluna d'Água.....	44
5.1.2 Concentração e diluição.....	47

5.1.3	Temperatura e salinidade	48
5.2.	Fase Passiva.....	49
5.2.1	Perfil longitudinal de concentração do centro de massa da pluma.....	50
5.2.1.1	Cenário de Verão	50
5.2.1.2	Cenário de Inverno.....	56
5.2.1	Perfil radial	62
5.2.1.1	Cenário de Verão	62
5.2.1.2	Cenário de Inverno.....	65
5.3.	Fase Dinâmica + Fase Passiva.....	67
6.	Conclusões	69
7.	Bibliografia.....	70

Índice das imagens

Figura 1: Localização do ponto de descarte (vermelho) inserido no bloco BM-C-41 (branco). A área destacada representa a Bacia de Campos.....	13
Figura 2: Localização do ponto de grade do NCEP mais próximo ao local de descarte.	16
Figura 3: Rosa dos ventos para os meses de janeiro a junho do ponto de grade do NCEP mais próximo ao local de descarte.	17
Figura 4: Rosa dos ventos para os meses de julho a dezembro do ponto de grade do NCEP mais próximo ao local de descarte.	18
Figura 5: Rosa dos ventos para o período de verão e inverno.	19
Figura 6: Histogramas de temperatura do ar para o período de verão e inverno, no ponto de grade do NCEP mais próximo ao local de descarte.	20
Figura 7: 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 julho de 2011.	22
Figura 8: 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 julho de 2011.	22
Figura 9: Localização do ponto de grade do HYCOM mais próximo ao local de descarte.....	25
Figura 10: Perfil de correntes utilizado para as simulações do cenário de verão. Os círculos envolvendo os vetores são proporcionais à velocidade e seus valores (em m/s) podem ser observados na escala de cor ao lado.	27
Figura 11: Perfis de temperatura, salinidade e densidade obtidos usados nas simulações do cenário de verão.	29
Figura 12: Perfil de correntes utilizado para as simulações do cenário de inverno. Os círculos envolvendo os vetores são proporcionais à velocidade e seus valores (em m/s) podem ser observados na escala de cor ao lado.	31

Figura 13: Perfis de temperatura, salinidade e densidade obtidos usados nas simulações do cenário de inverno.	33
Figura 14: Probabilidade de ocorrência de alturas individuais (m) em condições de bom tempo (a) e mau tempo (b). Fonte: Pinho, 2003.....	34
Figura 15: Probabilidade de ocorrência de períodos individuais (s) em condições de bom tempo (a) e mau tempo (b). Fonte: Pinho, 2003.....	35
Figura 16: Representação esquemática das três fases descritas pelo modelo OOC.	36
Figura 17: Fluxograma representativo do algoritmo do modelo OOC.	37
Figura 18: Representação esquemática da condição quase-estacionária do efluente. A área destacada representa o tempo de duração do descarte e as linhas coloridas, as distâncias da fonte.	42
Figura 19: Perfil longitudinal (painel superior) e em planta (painel inferior) obtido na fase dinâmica da pluma, durante o cenário de verão.....	45
Figura 20: Perfil longitudinal (painel superior) e em planta (painel inferior) obtido na fase dinâmica da pluma, durante o cenário de inverno.....	46
Figura 21: Concentração máxima (painel superior) e diluição mínima (painel inferior) com a distância da fonte durante a fase dinâmica, nos cenários de verão (laranja) e inverno (azul). A linha preta tracejada representa o limiar do CENO.....	47
Figura 22: Variação da temperatura (painel superior) e salinidade (painel inferior) com a distância da fonte durante a fase dinâmica, durante o verão (laranja) e o inverno (azul). As linhas tracejadas representam a temperatura e salinidade ambiente ao final da fase dinâmica.....	48
Figura 23: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido 30 minutos após o início do descarte, no cenário de verão.....	51
Figura 24: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido 1 hora após o início do descarte, no cenário de verão.	52
Figura 25: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido durante a condição estacionária da pluma, no cenário de verão.	53

Figura 26: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido 30 minutos após o término do descarte, no cenário de verão.	54
Figura 27: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido 1 hora após o término do descarte, no cenário de verão.	55
Figura 28: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido 30 minutos após o início do descarte, no cenário de inverno.....	56
Figura 29: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido 1 hora após o início do descarte, no cenário de inverno.	57
Figura 30: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido após 3 horas após o início do descarte, no cenário de inverno.....	58
Figura 31: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido durante a condição estacionária da pluma, no cenário de inverno.....	59
Figura 32: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido 30 minutos após o término do descarte, no cenário de inverno.	60
Figura 33: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido 1 hora após o término do descarte, no cenário de inverno.....	61
Figura 34: Localização dos perfis radiais da pluma para o cenário de verão.....	63
Figura 35: Perfis radiais de concentração decorrentes do descarte de água de produção, no período de verão, até a distância de 100 m.....	63
Figura 36: Perfis radiais de concentração decorrentes do descarte de água de produção, no período de verão, de 20 a 1000 m de distância.....	64
Figura 37: Localização dos perfis radiais da pluma para o cenário de inverno.	65

Figura 38: Perfis radiais de concentração decorrentes do descarte de água de produção no período de inverno, até a distância de 100 m.....	66
Figura 39: Perfis radiais de concentração decorrentes do descarte da água de produção no período de inverno, de 200 a 500 m.....	66
Figura 40: Concentração máxima (painel superior) e diluição mínima (painel inferior) da pluma com a distância da fonte após a fase passiva, nos cenários de verão (laranja) e inverno (azul).....	68

Índice das tabelas

Tabela 1: Características do efluente descartado.	14
Tabela 2: Estatística mensal os dados de ventos para o período de 1979 a 2010.	20
Tabela 3: Valores de temperatura do ar e intensidade do vento.	21
Tabela 4: Variância explicada pelo primeiro modo da EOF para os dados de corrente, temperatura e salinidade, no cenário de verão.....	26
Tabela 5: Componentes u e v , e respectiva intensidade da corrente utilizados no cenário de verão.	28
Tabela 6: Dados de temperatura e salinidade utilizados no cenário de verão.	29
Tabela 7: Variância explicada pelo Primeiro Modo da EOF para os dados de corrente, temperatura e salinidade, no cenário de inverno.....	30
Tabela 8: Componentes u e v , e respectiva intensidade da corrente utilizados no cenário de inverno.	32
Tabela 9: Dados de temperatura e salinidade utilizados no cenário de inverno.	33
Tabela 10: Altura significativa e período de pico utilizado.	35
Tabela 11: Tempo inicial e final (em horas) para cada cenário, em relação à distância da fonte.	43
Tabela 12: Resultados obtidos na fase dinâmica.	49
Tabela 13: Valores de concentração e diluição desejados e os valores obtidos ao término da fase dinâmica.....	49
Tabela 14: Distâncias da fonte onde o índice de toxicidade (CENO) é alcançado, de acordo com o tempo simulado no cenário de verão.	56
Tabela 15: Distâncias da fonte onde o índice de toxicidade (CENO) é alcançado, de acordo com o tempo simulado no cenário de inverno.	61
Tabela 16: Concentração máxima (%) e diluição mínima (vezes) da pluma formada no descarte de água de produção, em cada radial do cenário de verão.....	65

Tabela 17: Concentração máxima (%) e diluição mínima (x) da pluma formada no descarte de água de produção, em cada radial do cenário de inverno..... 67

Equipe técnica

Nome: Ana 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: Bruna Cerrone

Registro no Conselho de Classe: -

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 768292

Responsável pela(s) Seção(ões): todas

Assinatura: _____

Nome: Natalia Gomes

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

Este estudo apresenta os resultados, obtidos através de modelagem numérica, do comportamento físico da dispersão da pluma de água produzida a ser descartada durante as operações no bloco BM-C-41, na Bacia de Campos.

O trabalho foi dividido em duas etapas. A primeira consiste na ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS METEO-OCEANOGRÁFICAS da região, mais especificamente, os parâmetros capazes de afetar o comportamento da pluma do efluente lançado.

Na segunda etapa foi realizada a SIMULAÇÃO DA DISPERSÃO DA PLUMA, para os cenários meteo-oceanográfico escolhidos, estimando o comportamento do efluente a ser lançado em cada um deles.

O relatório visa atender às especificações da Resolução CONAMA n° 393/07 e do Termo de Referência n° 08/2011, sendo de particular interesse a variação da concentração do fluido com a distância da fonte. O limiar de interesse monitorado refere-se ao índice de toxicidade CENO (Concentração de Efeito não Observado).

2. Descrição da atividade

O local de onde está previsto o descarte da água produzida, está localizado na Baía de Campos, nas coordenadas 23°29'56,17"S e 41°25'50,66"W, inserido no bloco BM-C-41. Esta localidade encontra-se em uma lâmina d'água de 135 m, e possui uma distância, e torno de, 91,2 km da cidade de Cabo Frio, litoral do Rio de Janeiro (Figura 1).

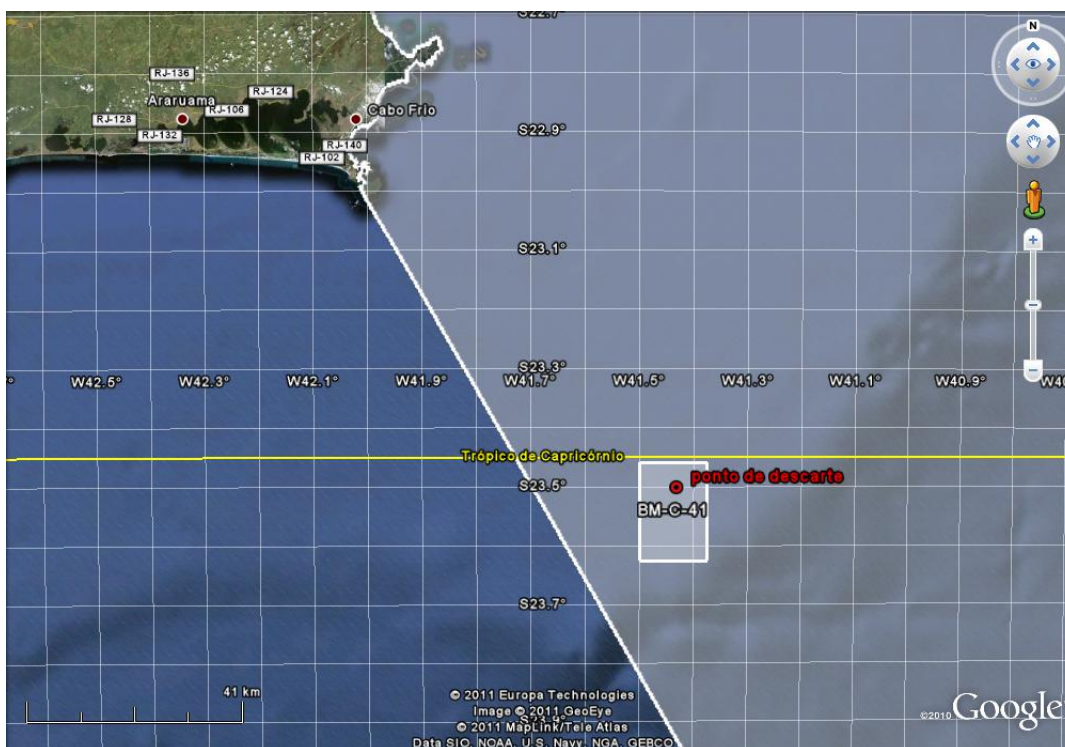


Figura 1: Localização do ponto de descarte (vermelho) inserido no bloco BM-C-41 (branco). A área destacada representa a Baía de Campos.

De acordo com as informações fornecidas pela contratante, o efluente será descartado no mar a uma vazão de aproximadamente 135.000 bbl/dia (894,3 m³/h). O descarte será realizado na superfície, com uma temperatura de 90°C e salinidade de 128,1, resultando em uma densidade de 1070,0 kg/m³.

As características do descarte de água produzida são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características do efluente descartado.

Descrição	unidade	dados	unidade	dados
latitude	°	23°29'56.17" S*	-	-
longitude	°	41°25'50.66" W*	-	-
prof. lâmina d'água local	m	135	-	-
Dados do descarte				
vazão	m ³ /h	894.30	bbl/h	5625.0
raio da tubulação do descarte	m	2.13	ft	7.0
profundidade do descarte	m	superfície	ft	superfície
volume	m ³	21463.28	bbl	135000.0
duração do descarte	h	24	s	86400.0
temperatura do efluente	°C	90	-	-
salinidade do efluente	-	128.1	-	-
densidade do efluente	kg/m ³	1070.0	g/cm ³	1.070
Dados do efluente				
concentração inicial	%	100	-	-
CENO	%	0.10	-	-

*Coordenadas geográficas referenciadas ao Datum SAD69.

3. Características meteo-oceanográficas da região

Para a caracterização oceanográfica da região foram utilizados dados de parâmetros oceanográficos de variadas fontes:

- » Dados de vento e temperatura do ar das Reanálises do NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research), disponíveis em: <http://www.cdc.noaa.gov/data/reanalysis/reanalysis.shtml>. Acessado em julho de 2011;
- » Dados de corrente, temperatura e salinidade do HYCOM Consortium disponíveis em: <http://www.hycom.org/dataserver/>. Acessado em julho de 2011;
- » Descrição da literatura disponível sobre o regime de ondas na região (VIOLANTE-CARVALHO, 1998; PINHO, 2003).

3.1. Vento e temperatura do ar

Os dados de vento e temperatura do ar utilizados como forçantes do modelo são provenientes das Reanálises do NCEP – *National Centers for Environmental Prediction*. 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

Para este estudo, foram tratados 30 anos de dados (1981 a 2010) com uma frequência temporal de 6 horas (4 dados por dia). A resolução espacial na área em questão é de aproximadamente 1/8°. Essa análise possibilitou a definição de dois períodos sazonais (verão e inverno), de acordo com os resultados distintos encontrados para a direção do vento.

A seguir, são apresentadas as rosas dos ventos, elaboradas para o período analisado (1981 a 2010), no ponto mais próximo ao local de descarte (Figura 2, Figura 3 e Figura 4).

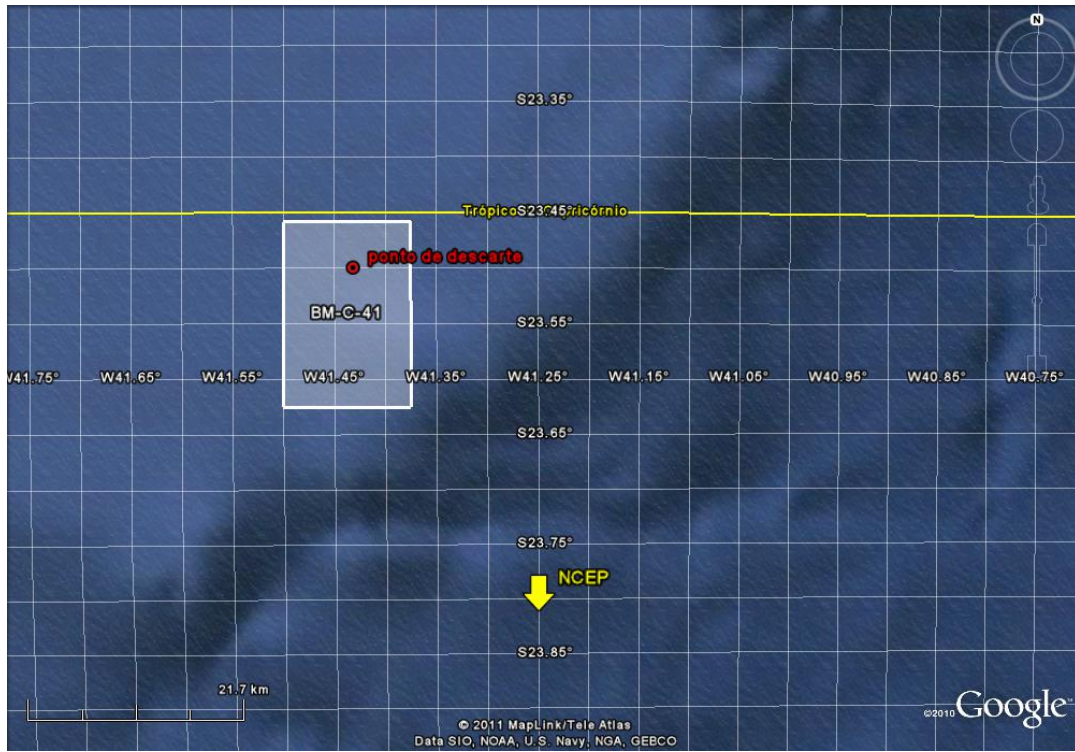


Figura 2: Localização do ponto de grade do NCEP mais próximo ao local de descarte.

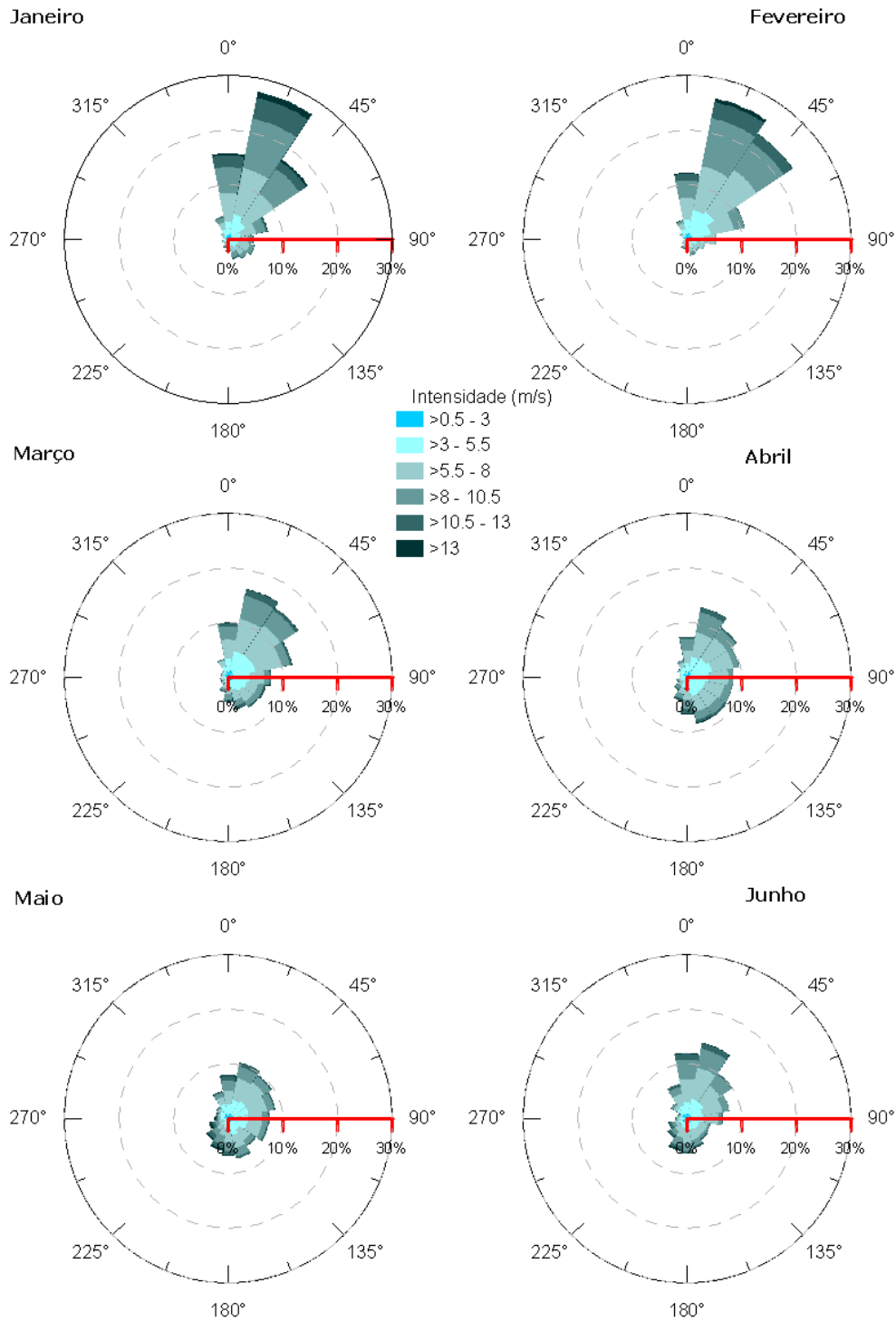


Figura 3: Rosa dos ventos para os meses de janeiro a junho do ponto de grade do NCEP mais próximo ao local de descarte.

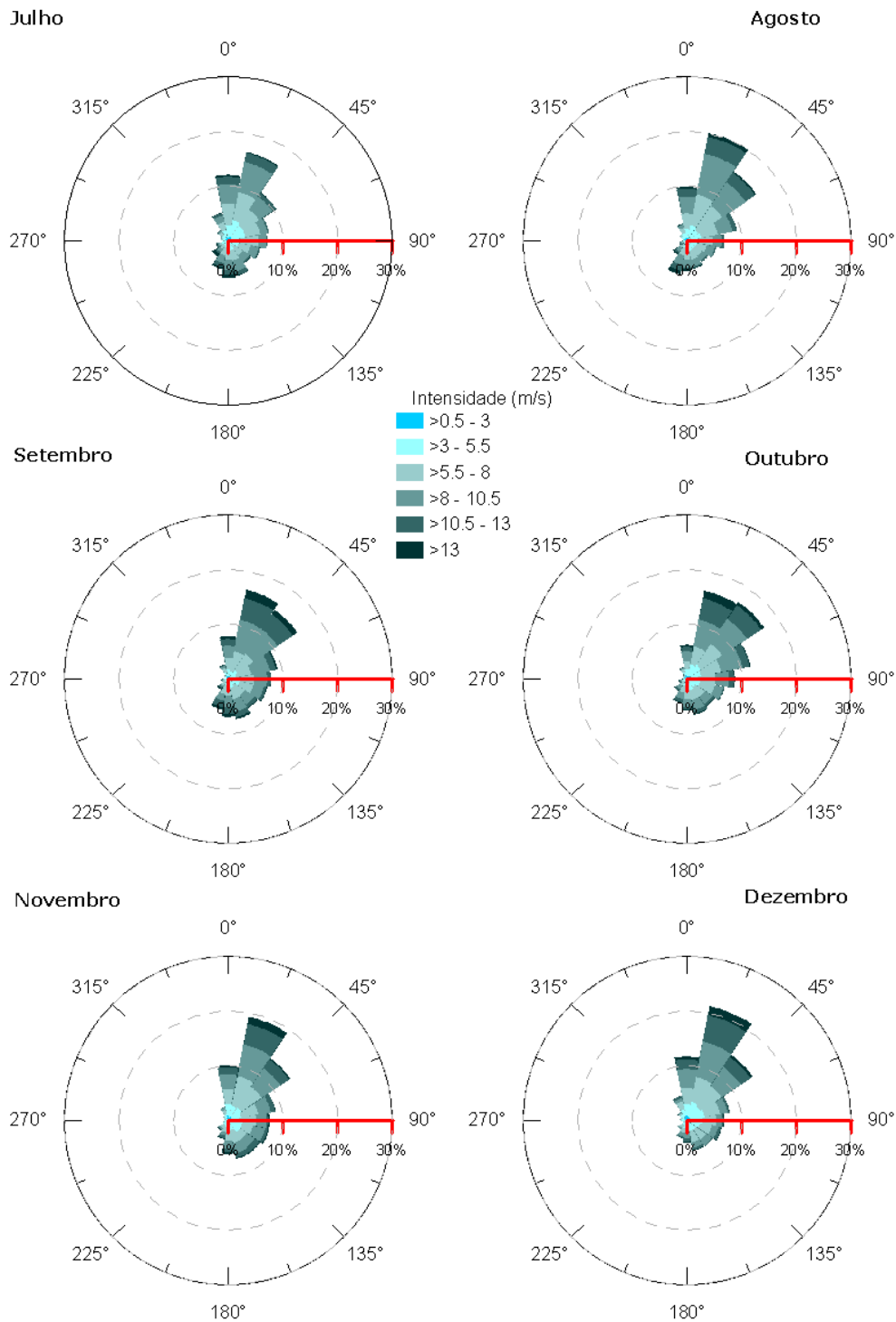


Figura 4: Rosa dos ventos para os meses de julho a dezembro do ponto de grade do NCEP mais próximo ao local de descarte.

Após a observação da rosa dos ventos, que trazem informações sobre as frequências de ocorrência conjunta de direção e intensidade dos ventos na região, foram identificados dois cenários ambientais a serem utilizados no presente estudo.

O primeiro, denominado período de **verão**, compreende os meses de **setembro a fevereiro** e é caracterizado pela maior frequência de ventos de norte-nordeste e nordeste, sendo o último o mais intenso. Também foi registrada a ocorrência de ventos de sudeste, porém com menor frequência.

O segundo período, denominado período de **inverno**, compreende os meses de **março a agosto**, em que também há uma maior ocorrência dos ventos de norte-nordeste, porém com uma frequência menor que os observados no período de verão. Além disso, a frequência e a incidência de ventos de sul e sudeste, neste segundo período, foram maiores.

Na Figura 5, são apresentadas as rosas dos ventos para o período de verão e inverno, resultante da análise dos 30 anos de dados.

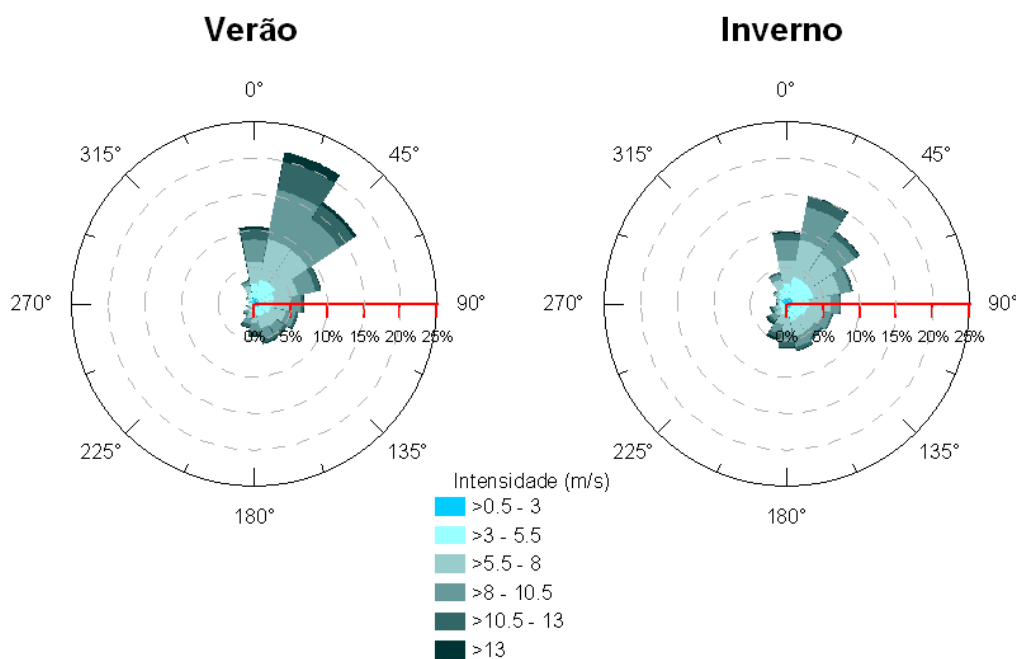


Figura 5: Rosa dos ventos para o período de verão e inverno.

A estatística mensal dos dados de vento apresentada na Tabela 2 ajuda a identificar a variabilidade apresentada pelo vento ao longo dos anos.

Tabela 2: Estatística mensal os dados de ventos para o período de 1979 a 2010.

Meses	Direção (°)	Intensidade média (m/s)	Desvio Padrão
Jan	NE	7,16	2,83
Fev	NE	6,62	2,70
Mar	NE	6,12	2,70
Abr	E	6,20	2,63
Mai	E	6,44	2,98
Jun	NE	6,46	2,76
Jul	NE	7,07	2,88
Ago	NE	7,43	2,91
Set	E	8,06	3,08
Out	NE	7,53	3,08
Nov	NE	7,34	3,11
Dez	NE	7,15	3,15

Para avaliação dos valores sazonais da temperatura do ar, a Figura 6 apresenta os histogramas representativos dos períodos de verão e inverno, no ponto do NCEP mais próximo ao local de descarte.

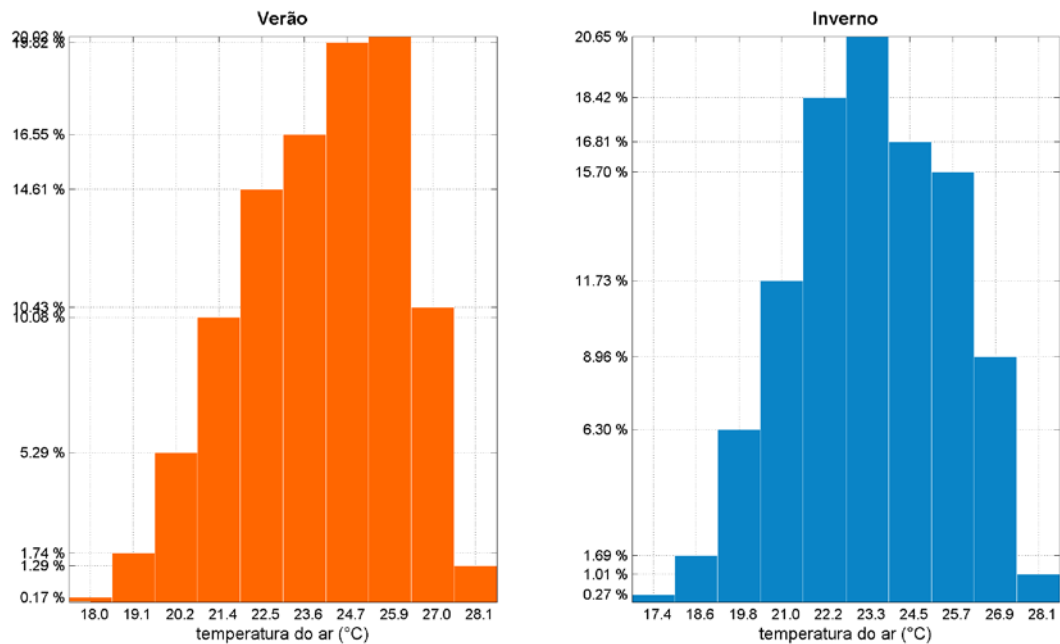


Figura 6: Histogramas de temperatura do ar para o período de verão e inverno, no ponto de grade do NCEP mais próximo ao local de descarte.

O inverno apresenta uma maior ocorrência de menores temperaturas quando comparadas ao cenário de verão, com pico em 23,3° C. Já no verão, a maior ocorrência é referente à temperatura de 25,9° C.

Com base nos resultados apresentados, os valores de intensidade do vento e temperatura do ar escolhidos para modelagem estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Valores de temperatura do ar e intensidade do vento.

Cenário	Temperatura do ar (°C)	Intensidade do vento (m/s)
Verão	25,9	7,31
Inverno	23,3	6,62

3.2. Base hidrodinâmica utilizada

3.2.1 Descrição do modelo

O HYCOM 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 isopicnais 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 isopicnal), 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 isopicnais, 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). As Figura 7 e Figura 8 ilustram a estrutura híbrida do modelo.

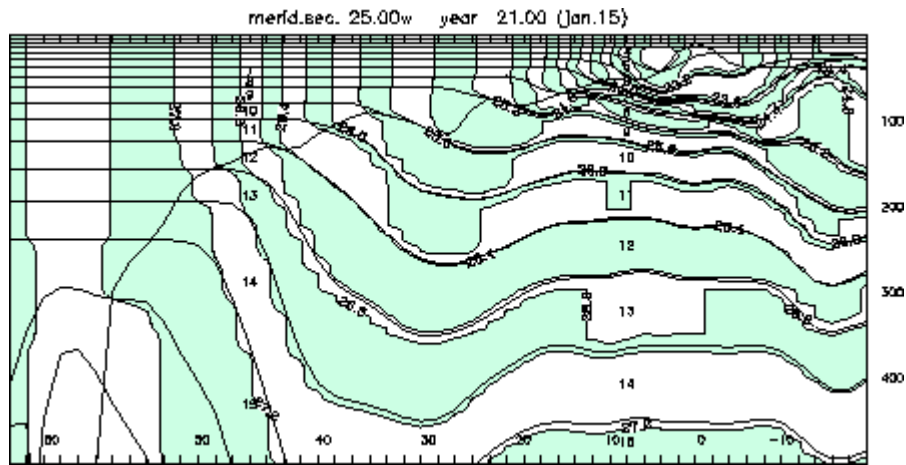


Figura 7: Seção meridional do HYCOM na longitude de 25° W, na porção leste do Atlântico Norte no dia 15 de janeiro de 2002. Área sombreada: densidade. Linhas finas: interfaces das camadas. Linha grossa: profundidade da camada de mistura. Fonte: <http://www.hycom.org/hycom/overview>.

Acessado em julho de 2011.

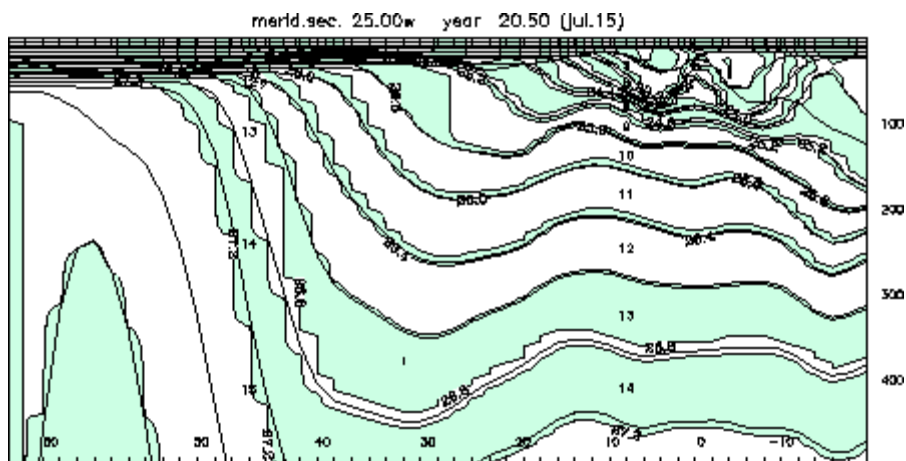


Figura 8: Seção meridional do HYCOM na longitude de 25° W, na porção leste do Atlântico Norte no dia 15 de julho de 2002. Área sombreada: densidade. Linhas finas: interfaces das camadas. Linha grossa: profundidade da camada de mistura. Fonte: <http://www.hycom.org/hycom/overview>.

Acessado em julho de 2011.

3.2.2 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):

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t_s} + \nabla_s \frac{v^2}{2} + (\zeta + f) \mathbf{k} \times \mathbf{v} + \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right) \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial p} + \nabla_s M - p \nabla_s \alpha \\ = -g \frac{\partial \tau}{\partial p} + \left(\frac{\partial p}{\partial s} \right)^{-1} \nabla_s \cdot \left(\mathbf{v} \frac{\partial p}{\partial s} \nabla_s \mathbf{v} \right) \end{aligned} \quad (3-1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \left(\frac{\partial p}{\partial s} \right) + \nabla_s \cdot \left(\mathbf{v} \frac{\partial p}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right) = 0 \quad (3-2)$$

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

Onde $\mathbf{v} = (u, v)$ é o vetor velocidade horizontal, p é a pressão, θ representa as variáveis termodinâmicas, α é o volume específico potencial, ζ é a vorticidade relativa, M é o potencial de Montgomery, f é o parâmetro de Coriolis, \mathbf{k} é o vetor vertical unitário, ν é o coeficiente variável de viscosidade/difusividade, τ é o vetor de estresse de cisalhamento induzido pelo vento ou pelo fundo e H_θ representa o somatório dos termos fonte diabáticos, incluindo a mistura diapicnal, que atua em θ . 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 (3 - 2) se torna uma equação prognóstica para o peso da camada por unidade de área, $\Delta p = p_{\text{inf}} - p_{\text{sup}}$ (BLECK, 2002):

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \Delta p + \nabla_s \cdot (v \Delta p) + \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right)_{\text{inf}} - \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right)_{\text{sup}} = 0 \quad (3-4)$$

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

A multiplicação de (3 - 1) por $(\partial p / \partial s)$ e integração no intervalo $(S_{\text{sup}}, S_{\text{inf}})$, seguida pela divisão por $(\Delta p / \Delta s)$, modifica o termo de estresse de cisalhamento nesta equação para (BLECK, 2002):

$$\frac{g}{\Delta p} (\tau_{\text{sup}} - \tau_{\text{inf}}) \quad (3-5)$$

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

$$(\Delta p)^{-1} \nabla_s \cdot (v \Delta p \nabla_s v) \quad (3-6)$$

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 (3 - 4) expressa em camadas integradas é da forma de:

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \theta \Delta p + \nabla_s \cdot (v \theta \Delta p) + \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right)_{\text{inf}} - \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right)_{\text{sup}} = \nabla_s \cdot (v \Delta p \nabla_s \theta) + H_\theta \quad (3-7)$$

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 α^{-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).

3.3. Corrente, temperatura e salinidade

Para esta caracterização foram utilizados dados disponíveis do HYCOM *Consortium*, acessados em julho de 2011. Os resultados do *hindcast* que contempla a região do poço encontram-se disponíveis para utilização na página <http://www.hycom.org/dataserver>. Por terem sido utilizados resultados do modelo, não se têm informações a respeito das constantes utilizadas para a rodada desses dados, apenas das variáveis utilizadas nas equações que governam o HYCOM. Essas informações estão publicadas no manual do usuário do HYCOM, disponível no endereço: http://www.hycom.org/attachments/063_hycom_users_manual.pdf.

Os dados usados possuem uma resolução espacial de 1/12° e uma série temporal de janeiro de 2004 a dezembro de 2010. Os resultados obtidos pelo HYCOM se ajustam às principais características regionais descritas na literatura, o que valida a sua utilização neste estudo.

Na Figura 9, é apresentada a posição do ponto de grade do HYCOM mais próximo ao local de descarte.

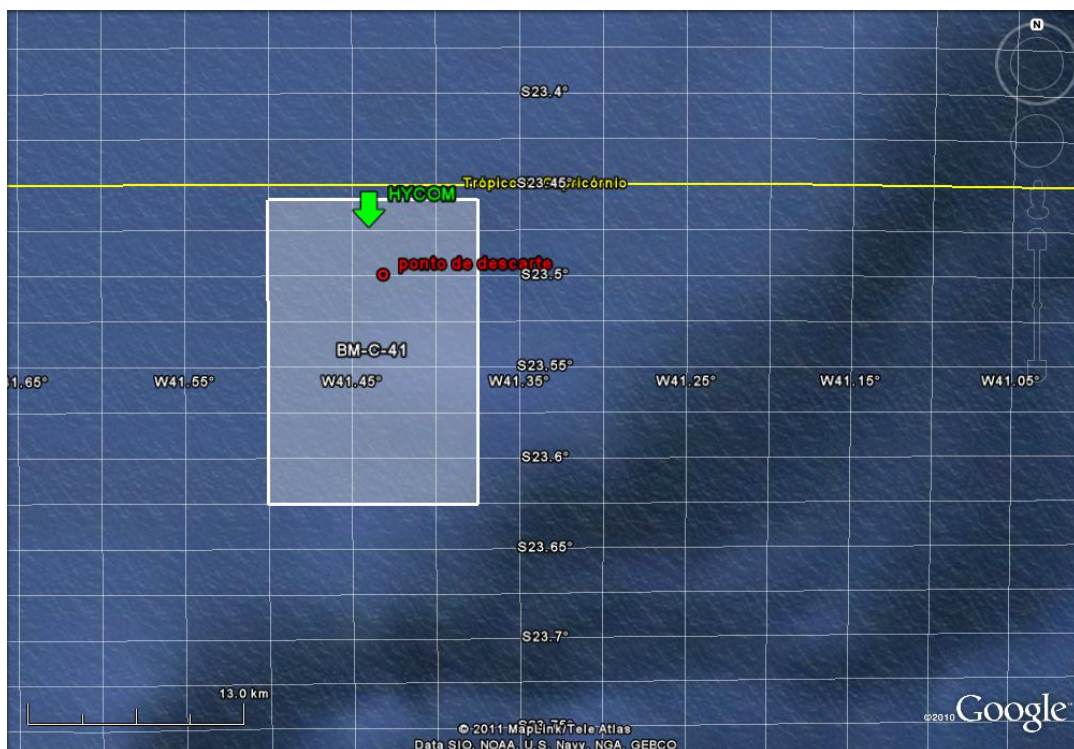


Figura 9: Localização do ponto de grade do HYCOM mais próximo ao local de descarte.

Os perfis de corrente, temperatura e salinidade utilizados como forçantes na simulação foram obtidos utilizando a técnica de análise de funções ortogonais empíricas (EOF), usada no

auxílio à compreensão da variabilidade de fenômenos oceanográficos através de séries temporais. Uma descrição desta técnica pode ser encontrada em Emery & Thomson (2004).

A análise da EOF oferece, associada a cada modo normal estatístico, uma descrição resumida da variabilidade espacial e temporal da dinâmica. Trata-se da decomposição dos dados em modos normais, onde é possível obter a variação temporal de cada um destes modos e também a quantificação da representatividade de cada modo dentro da variância total dos dados.

Os perfis sintéticos construídos são resultados do primeiro modo da EOF, que representa a maior parte da variância. Quanto à variação temporal, optou-se por utilizar o valor modal deste dado, de forma a representar a situação mais freqüente. Como já explicado anteriormente, o período referente ao verão e ao inverno foi escolhido com base no comportamento dos ventos na região.

3.3.1 *Cenário de Verão*

A Tabela 4 apresenta a variância explicada pelo primeiro modo da EOF, calculada para as componentes u e v da corrente, para a temperatura e a salinidade, no cenário de verão.

Tabela 4: Variância explicada pelo primeiro modo da EOF para os dados de corrente, temperatura e salinidade, no cenário de verão.

Parâmetro	Variância explicada
Componente u	83,7%
Componente v	86,1%
Temperatura	64,1%
Salinidade	69,2%

Os perfis sintéticos de corrente resultantes da análise EOF, para o cenário de verão, são apresentados na Figura 10.

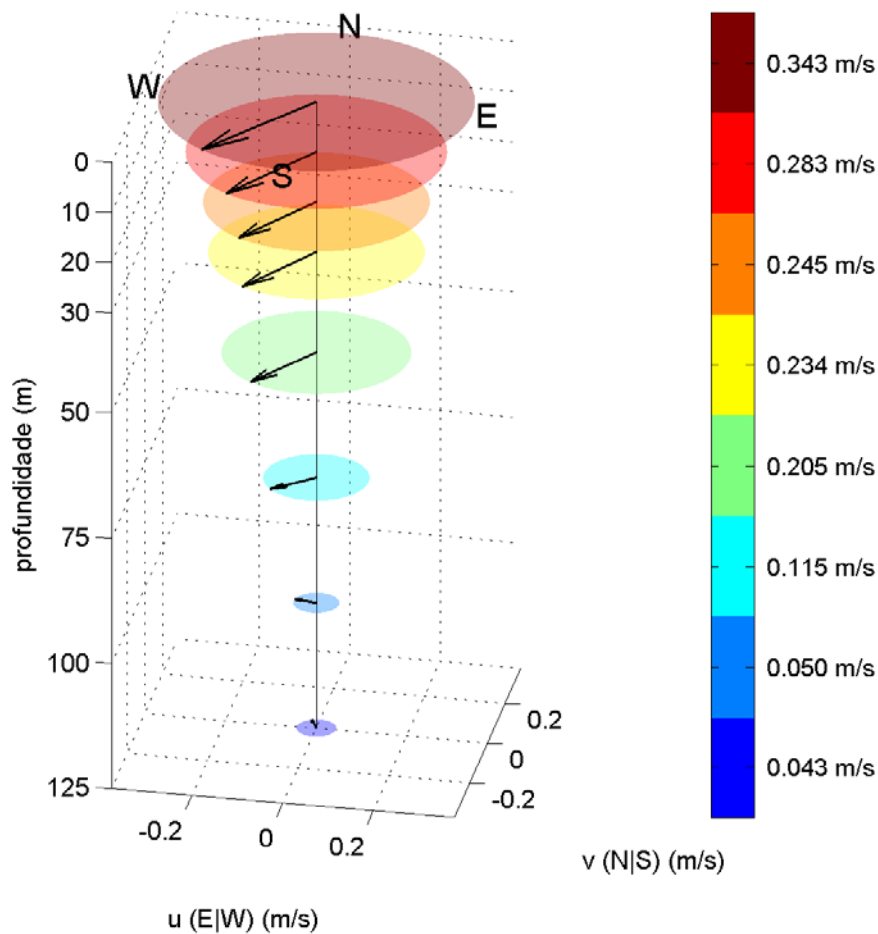


Figura 10: Perfil de correntes utilizado para as simulações do cenário de verão. Os círculos envolvendo os vetores são proporcionais à velocidade e seus valores (em m/s) podem ser observados na escala de cor ao lado.

Observa-se um fluxo para sudoeste até 75 m de profundidade, com uma inversão de sentido para noroeste nos últimos metros. Esse comportamento é explicado na literatura (STRAMMA; ENGLAND, 1999) como a passagem da Corrente do Brasil (CB) fluindo sobre a quebra da plataforma continental, no sentido sudoeste, nos primeiros metros da coluna d'água. A inversão de sentido da corrente é justificada pela Corrente de Contorno Intermediária (CCI) fluindo abaixo da CB, em direção ao Equador.

Há uma diminuição gradativa na intensidade da corrente na medida em que se aumenta a profundidade. A maior intensidade é observada em superfície (~0,34 m/s) e a menor em 100 m (~0,04 m/s).

Ressalta-se que os dados utilizados caracterizam um perfil sintético, que explica a maior parte da variabilidade do perfil de correntes local no cenário de verão. Sua utilização permite que os padrões de circulação da região sejam contemplados na modelagem.

Os valores das componentes da corrente utilizados nas simulações do cenário de verão, resultantes da análise EOF, podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5: Componentes u e v , e respectiva intensidade da corrente utilizados no cenário de verão.

profundidade (m)	componente u (m/s)	componente v (m/s)	intensidade (m/s)
0	-0,199	-0,280	0,343
10	-0,152	-0,239	0,283
20	-0,132	-0,207	0,245
30	-0,124	-0,198	0,234
50	-0,112	-0,172	0,205
75	-0,087	-0,075	0,115
100	-0,049	0,009	0,050
125	-0,017	0,040	0,043

Os dados de temperatura, salinidade e densidade utilizados nas simulações do cenário de verão são apresentados na Figura 11. As linhas claras representam os dados obtidos pelo modelo do HYCOM, e as linhas mais escuras representam os resultantes do primeiro modo da EOF.

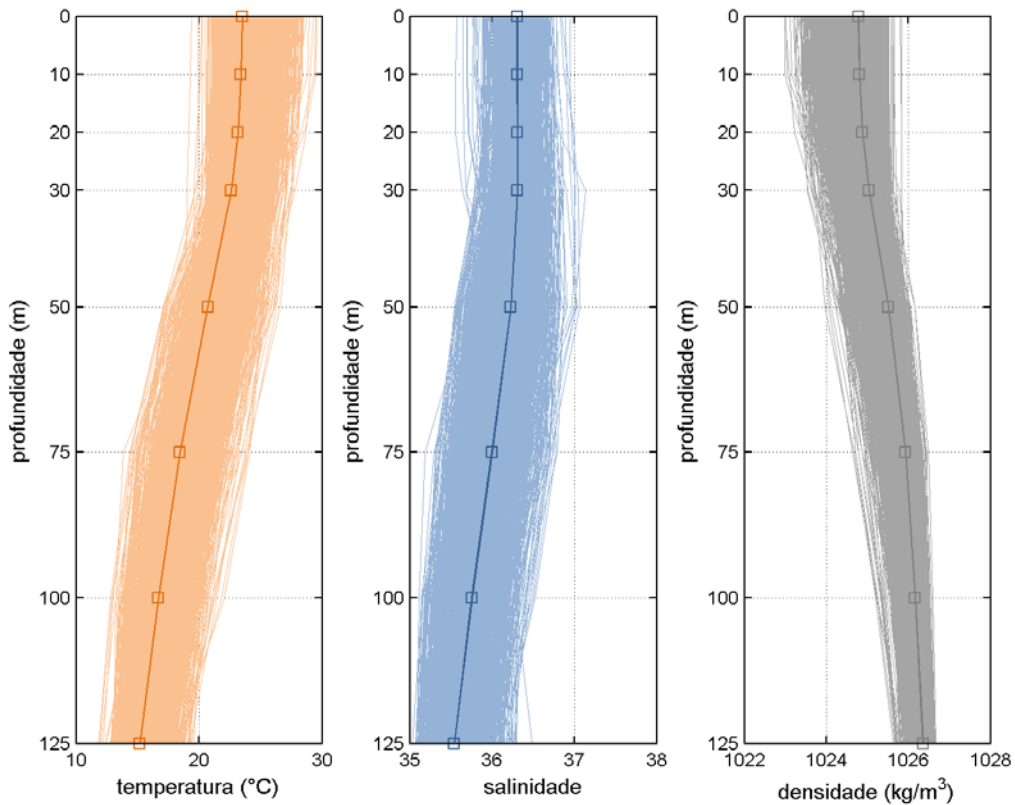


Figura 11: Perfis de temperatura, salinidade e densidade obtidos usados nas simulações do cenário de verão.

Na Tabela 6, são apresentados os dados de temperatura, salinidade e densidade obtidos pela EOF.

Tabela 6: Dados de temperatura e salinidade utilizados no cenário de verão.

profundidade (m)	temperatura (°C)	salinidade	densidade (kg/m ³)
0	23,514	36,304	1024,77
10	23,414	36,301	1024,80
20	23,162	36,308	1024,88
30	22,603	36,310	1025,04
50	20,695	36,226	1025,51
75	18,435	35,997	1025,93
100	16,696	35,750	1026,16
125	15,173	35,541	1026,35

A temperatura apresenta seu maior valor em superfície (~23,5 °C), diminuindo gradativamente até atingir um mínimo de 15,17 a 125 m. A salinidade apresenta o maior valor a 30 m (~36,31)

e o menor em 125 m (~35,5). Como nesta região a temperatura tem maior influência sobre a densidade, ela tende a seguir o comportamento inverso da temperatura, uma vez que águas frias são mais densas que quentes. Com isso, a densidade tende a aumentar gradativamente com a profundidade, atingindo seu valor máximo (1026,35 kg/m³) a 125 m.

3.3.2 Cenário de Inverno

A Tabela 7 apresenta a variância explicada pelo primeiro modo da EOF, calculada para as componentes u e v da corrente, para a temperatura e a salinidade, no cenário de inverno.

Tabela 7: Variância explicada pelo Primeiro Modo da EOF para os dados de corrente, temperatura e salinidade, no cenário de inverno.

Parâmetro	Variância explicada
Componente u	87,0%
Componente v	88,3%
Temperatura	64,4%
Salinidade	75,9%

Os perfis sintéticos de corrente resultantes da análise EOF, para o cenário de inverno, são apresentados na Figura 12.

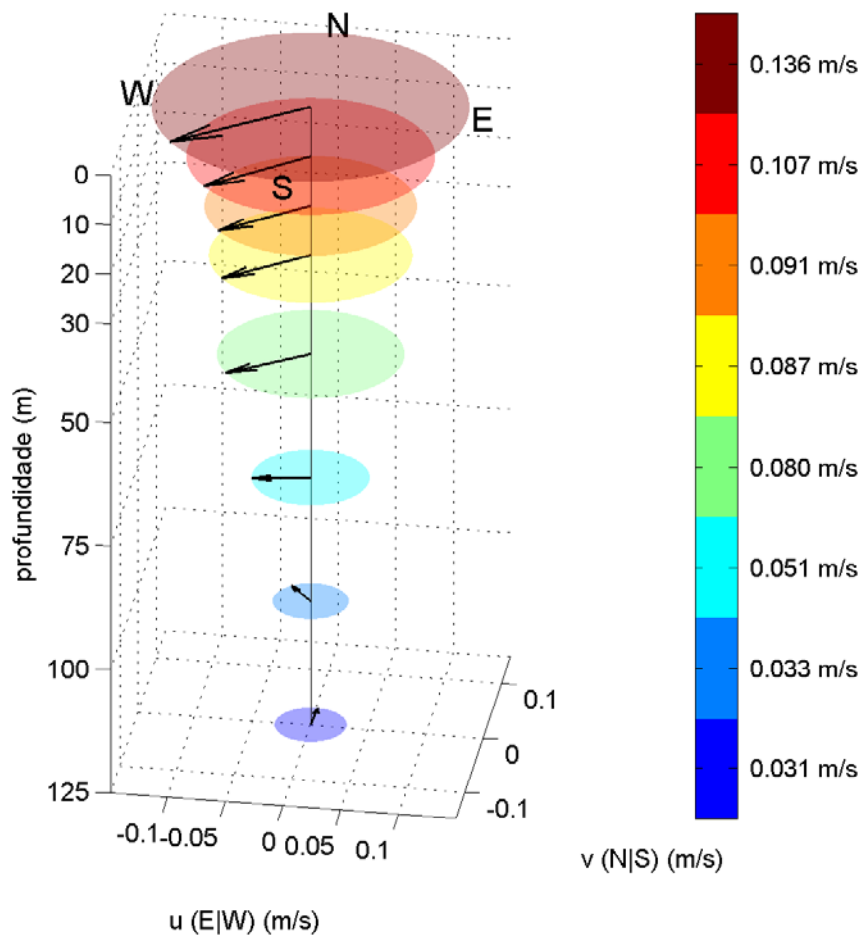


Figura 12: Perfil de correntes utilizado para as simulações do cenário de inverno. Os círculos envolvendo os vetores são proporcionais à velocidade e seus valores (em m/s) podem ser observados na escala de cor ao lado.

O fluxo se orienta totalmente para sudoeste até 50 m de profundidade, com uma inversão no sentido da corrente nos próximos metros, culminando em um deslocamento para norte na última profundidade. Esse comportamento é justificado pelo deslocamento preferencial da Corrente do Brasil (CB) sobre a quebra da plataforma continental, nos primeiros metros, e da Corrente de Contorno Intermediária (CCI) subjacente à CB.

A maior intensidade é observada em superfície (~0,14 m/s), diminuindo gradativamente até 125 m (~0,03 m/s). Os valores observados no inverno são notavelmente inferiores aos do verão.

Os valores das componentes da corrente utilizados nas simulações, resultantes da análise EOF, podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8: Componentes u e v , e respectiva intensidade da corrente utilizados no cenário de inverno.

profundidade (m)	componente u (m/s)	componente v (m/s)	intensidade (m/s)
0	-0,109	-0,081	0,136
10	-0,082	-0,068	0,107
20	-0,071	-0,057	0,091
30	-0,069	-0,053	0,087
50	-0,066	-0,045	0,080
75	-0,050	-0,009	0,051
100	-0,021	0,025	0,033
125	0,001	0,031	0,031

Os dados de temperatura, salinidade e densidade utilizados nas simulações do cenário de inverno são apresentados na Figura 13. As linhas claras representam os dados obtidos pelo modelo do HYCOM, e as linhas mais escuras representam os resultantes do primeiro modo da EOF.

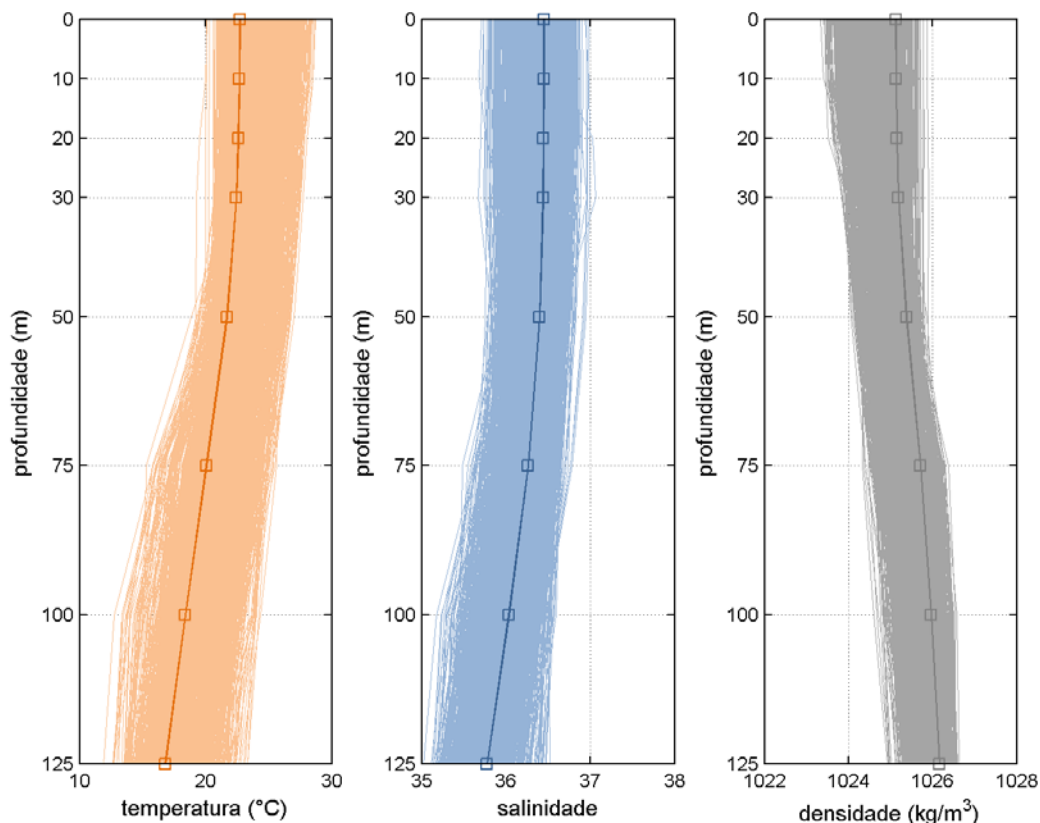


Figura 13: Perfis de temperatura, salinidade e densidade obtidos usados nas simulações do cenário de inverno.

Na Tabela 9, são apresentados os dados de temperatura, salinidade e densidade obtidos pela EOF para o cenário de inverno.

Tabela 9: Dados de temperatura e salinidade utilizados no cenário de inverno.

profundidade (m)	temperatura (°C)	salinidade	densidade (kg/m ³)
0	22,706	36,447	1025,12
10	22,665	36,447	1025,13
20	22,593	36,445	1025,15
30	22,429	36,437	1025,19
50	21,671	36,399	1025,37
75	20,051	36,261	1025,71
100	18,374	36,031	1025,97
125	16,782	35,775	1026,16

Assim como no verão, a temperatura apresenta valor máximo em superfície (~22,7 °C), diminuindo gradativamente com o aumento de profundidade (~16,8 a 125 m). A salinidade

apresenta o mesmo padrão da temperatura, com o maior valor, de 36,45, na superfície e o menor, de 35,78, no fundo. A partir do comportamento, tanto da temperatura quanto da salinidade, a densidade tende a aumentar com a profundidade, atingindo seu valor máximo (1026,2 kg/m³) a 125 m.

3.4. Ondas

Os estudos de Violante-Carvalho (1998) e Pinho (2003) indicam que na costa da região Sudeste brasileira, especialmente na Baía de Campos, as condições meteorológicas podem ser divididas, basicamente, em duas situações:

- » bom tempo, quando prevalece a influência do anticiclone semipermanente do Atlântico Sul (ASAS), com vento dominante de Nordeste/Leste (NE/E) e, *a priori*, condições de mar mais amenas;
- » mau tempo, quando da passagem de sistema frontais, com ventos dos quadrantes Sudoeste/Sudeste (SW/SE) e maior agitação.

Na Figura 14 e na Figura 15, são apresentados histogramas com a probabilidade de ocorrência de alturas e períodos individuais em situações de bom e mau tempo.

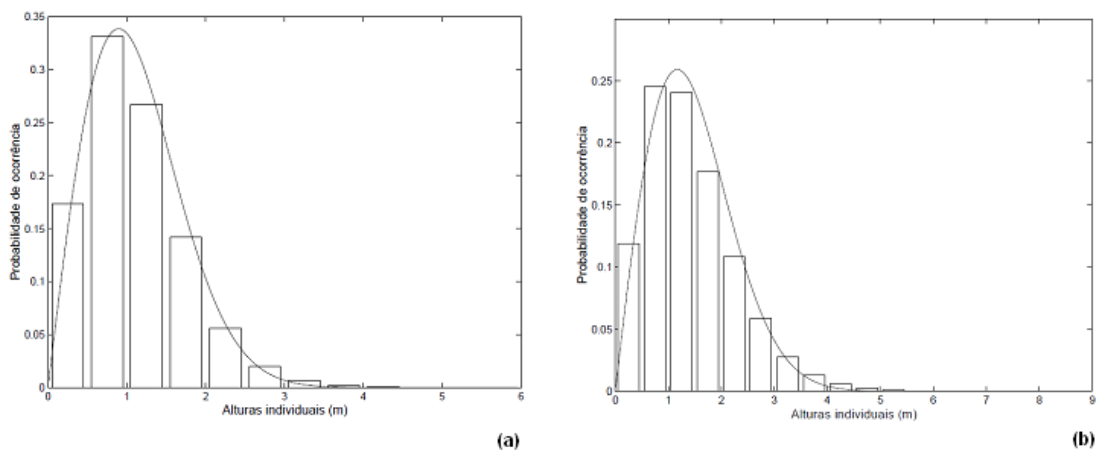


Figura 14: Probabilidade de ocorrência de alturas individuais (m) em condições de bom tempo (a) e mau tempo (b). Fonte: Pinho, 2003.

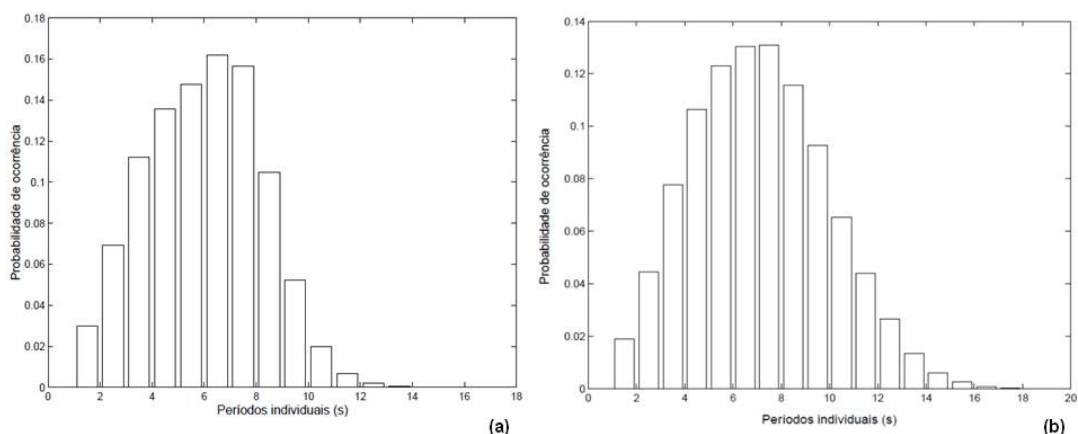


Figura 15: Probabilidade de ocorrência de períodos individuais (s) em condições de bom tempo (a) e mau tempo (b). Fonte: Pinho, 2003.

Apesar dos períodos e alturas apresentarem uma pequena variação quando comparadas as duas situações, o objetivo deste estudo é auxiliar a avaliação de impacto da operação. Assim, acredita-se que pouca contribuição é dada por situações atípicas, aquelas com pouca frequência de ocorrência e persistência. Por isso, optou-se pelo uso dos valores típicos, de maior ocorrência na região.

Desta forma, os resultados encontrados por Violante-Carvalho (1998), na Bacia de Campos, podem ser utilizados para o estudo em questão. Segundo o autor, de todas as situações encontradas a mais comum, com ocorrência de 25,07% durante o período considerado, é um mar em desenvolvimento de Norte/Norte-Nordeste com ondulação de Sul/Sudeste.

Na Tabela 10, são apresentados os valores utilizados nas simulações.

Tabela 10: Altura significativa e período de pico utilizado.

Hs (m)	T (s)
1,25	7,5

4. Metodologia

4.1. Modelo de transporte

4.1.1 Descrição do Modelo

O modelo escolhido para este trabalho é conhecido pelo nome OOC (*Offshore Operators Committee*) e foi desenvolvido especialmente para simulações de descarte de efluentes de plataformas de petróleo.

O modelo OOC simula o comportamento de uma pluma de efluente desde o momento de descarte até um instante e distância determinados pelo usuário. Para tanto, o modelo trabalha em três módulos distintos, encarregados, cada um, de uma diferente fase da pluma (Figura 16).

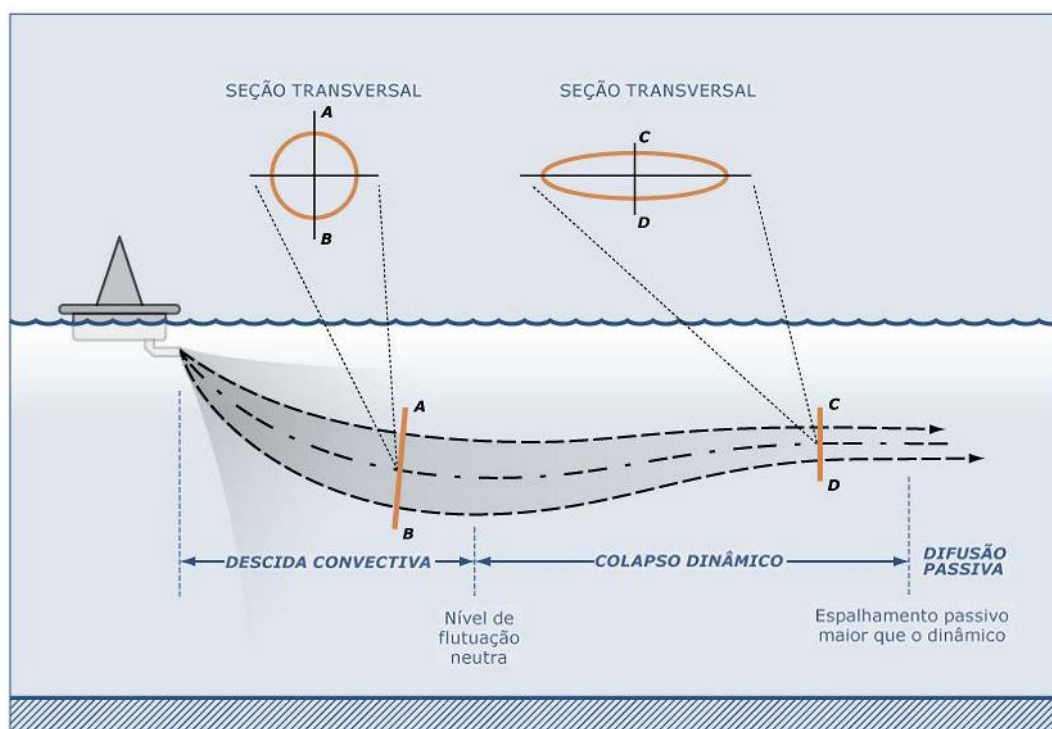


Figura 16: Representação esquemática das três fases descritas pelo modelo OOC.

O primeiro módulo cuida da diluição inicial da pluma, representada por um modelo integral. Este módulo acompanha a evolução do efluente do momento em que este deixa a fonte até que ele encontre uma superfície horizontal (fundo ou superfície do mar) ou até que se

estabilize no nível de flutuação neutra. Esta fase, também conhecida como *fase de jato*, ocorre enquanto o efluente possui movimento próprio, dado pela diferença de densidade com o meio ou pela velocidade de saída da fonte.

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. Neste momento tem início a última fase, denominada de fase de *dispersão passiva*, onde o efluente, a não ser pela velocidade vertical associada a cada constituinte particulado, não possui movimento próprio e segue apenas a dinâmica local. O OOC aplica a dispersão passiva separadamente para cada constituinte do efluente.

Um fluxograma representativo do algoritmo do modelo OOC é apresentado na Figura 17.

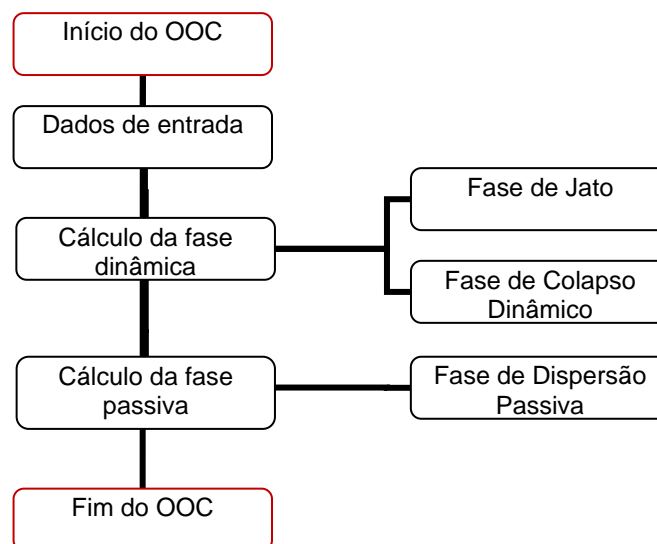


Figura 17: Fluxograma representativo do algoritmo do modelo OOC.

Uma descrição detalhada do modelo é encontrada em Brandsma & Smith (1999).

4.1.2 Equações Governantes

A formulação numérica do modelo que trata das fases dinâmicas (jato e colapso dinâmico) é baseada nas formulações de Koh & Chang (1973). Em relação à dispersão passiva, emprega-se um método Lagrangeano explícito desenvolvido para o OOC por Brandsma & Smith (1999).

O movimento de uma pluma é regido por equações de conservação de massa, *momentum*, fluabilidade, partículas constituintes, 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. Sendo, portanto, as taxas de mudanças descritas como derivadas em relação a esse eixo.

As equações de conservação são:

Massa:

$$\frac{d}{ds}(\rho Q) = E\rho_a - \sum_i S_i \rho_i \quad (4 - 1)$$

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

Momentum (Quantidade de Movimento):

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

$$\frac{d}{ds}(\rho QU) = \pi b^2 g(\rho - \rho_a)J + E\rho_a U_a - \sum_i (S_i \rho_i U) + F_D \quad (4 - 2)$$

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

Flutuabilidade:

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

$$\frac{d}{ds}(Q(\rho_a(0) - \rho)) = E(\rho_a(0) - \rho_a) - \sum_i S_i(\rho_a(0) - \rho_i) \quad (4 - 3)$$

Partículas constituintes:

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

Temperatura:

$$\frac{d}{ds}(Q(T_d - T_a)) = E(T_d - T_a) \quad (4 - 5)$$

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

Salinidade:

$$\frac{d}{ds}(Q(S_d - S_a)) = E(S_d - S_a) \quad (4 - 6)$$

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

A diferença entre as equações que descrevem o movimento da pluma durante a fase de jato e a fase de colapso está na variação da seção transversal destas fases. Durante a fase de jato, a seção é representada por uma área circular com raio (b) e na fase de colapso dinâmico assume-se que a área possui uma forma elíptica com um semi-eixo maior (a) e um semi-eixo menor (b). Assim as equações de conservação são escritas em função do fluxo de volume:

$$Q = \pi b^2 |\vec{U}| \quad (4 - 7)$$

para a fase de jato e

$$Q = \pi ab |\vec{U}| \quad (4 - 8)$$

na fase de colapso dinâmico.

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 Lagrangeano. O transporte se dá através de uma dada classe de partículas ou fluido que saem da fase dinâmica da pluma (fases de jato e de colapso dinâmico), dando origem às chamadas nuvens

de partículas, que, estando sujeitas aos processos de advecção e difusão provocados pelos campos hidrodinâmicos do ambiente, são rastreadas ao longo do tempo e do espaço (DIAS, 2005).

Para cada nuvem individual assume-se uma **distribuição Gaussiana** nas três dimensões, A concentração, C , é calculada como uma distribuição de uma nuvem Gaussiana:

$$C = \frac{m}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-z_0)^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (4-9)$$

onde se considera que o eixo principal da nuvem esteja alinhado com o sistema de coordenadas; 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 é a massa.

A nuvem é advectada horizontalmente de acordo com as correntes locais não havendo componente vertical da advecção:

$$X_{novo} = X_{antigo} + u_a \Delta t \quad (4-10)$$

$$Z_{novo} = Z_{antigo} + w_a \Delta t \quad (4-11)$$

onde X, Z são as coordenadas horizontais da nuvem, u_a, w_a são as velocidades ambientes locais e Δt é o passo de tempo.

4.1.3 Variáveis ambientais

Para simular o comportamento da pluma do efluente é necessário que alguns parâmetros físicos sejam antes definidos como dados de entrada para o modelo OOC.

Temperatura e salinidade: a densidade da água do mar, calculada pelo modelo a partir do perfil de temperatura e salinidade, é de extrema importância durante a fase ativa do efluente. Pois é a diferença de densidade entre o efluente e o meio aquoso que rege o espalhamento da pluma na coluna d'água.

Corrente: O sentido e a intensidade das componentes zonal e meridional atuam durante todas as fases do efluente, e são responsáveis pela orientação e dispersão das partículas sólidas do

efluente na coluna d'água. Quanto mais intensa for a corrente, maior será o distanciamento dos sólidos da fonte de descarte.

Ondas: As ondas de superfície, especificadas pela altura significativa e período de pico, são necessárias para que o modelo possa estimar o perfil do coeficiente de dispersão vertical. Entretanto, o modelo não considera os efeitos da ação das ondas na trajetória ou na concentração da pluma nas fases de jato e colapso dinâmico.

Intensidade do vento e temperatura do ar: são utilizados no cálculo da perda de calor que a pluma de água produzida sofre ao aflorar na superfície. Entretanto, esses parâmetros não influenciam nos resultados se a pluma não atingir esse limite.

4.2. Estratégias de modelagem

4.2.1 Concentração e fator de diluição

As plumas aqui estudadas serão monitoradas em função da concentração e da diluição.

É utilizado, nessa parte do estudo, um nível limite de concentração máxima e diluição mínima específico. O nível utilizado é resultante do teste de toxicidade CENO¹ realizado com o efluente. Desta forma, o índice de toxicidade utilizado como limiar no estudo é 0,10% da concentração inicial.

Para conhecer o limiar de diluição em que o efluente atinge o nível de concentração estabelecido pelo teste de toxicidade foi realizado o seguinte cálculo:

$$\text{limiar de diluição} = \frac{\text{concentração inicial}}{\text{limiar de concentração}}$$

4.2.2 Representação de descartes contínuos

Por considerarmos uma taxa de descarte constante e condições ambientais estacionárias (que não variam no tempo), durante a emissão do efluente, a concentração atinge um estado quase-estacionário até uma determinada distância da fonte. Desta forma, mesmo que o tempo

¹ CENO (concentração de efeito não observado): Maior concentração nominal da amostra que não causa efeito deletério estatisticamente significativo no desenvolvimento embrionário dos organismos, nas condições de ensaio.

de descarte dure mais que o tempo necessário para a pluma atingir este estado, os níveis de concentração não mudarão ao longo do tempo nesta região, por mais duradoura que seja esta emissão.

O método proposto por Brandsma & Smith (1999) foi utilizado para estimar o momento em que a pluma entra em condição estacionária ($t_{inicial}$) e o momento em que a pluma deixa essa condição (t_{final}):

$$t_{inicial} = \frac{X + 4\sigma}{u} \quad \text{e} \quad t_{final} = \frac{X - 4\sigma}{u} + t_{simulado}$$

onde $\sigma = \sigma_0 \left[1 + 4^{4/3} \frac{2}{3} \left(\frac{A_L \Delta t}{\sigma_0^{2/3}} \right) \right]$, X é a distância da fonte, u é a velocidade média da corrente

local, A_L um parâmetro de dissipação e σ_0 tamanho inicial da pluma, estimado na ordem de grandeza do tubo de descarte.

Uma representação esquemática do momento em que o efluente entra e sai do estado quase-estacionário é apresentada na Figura 18.

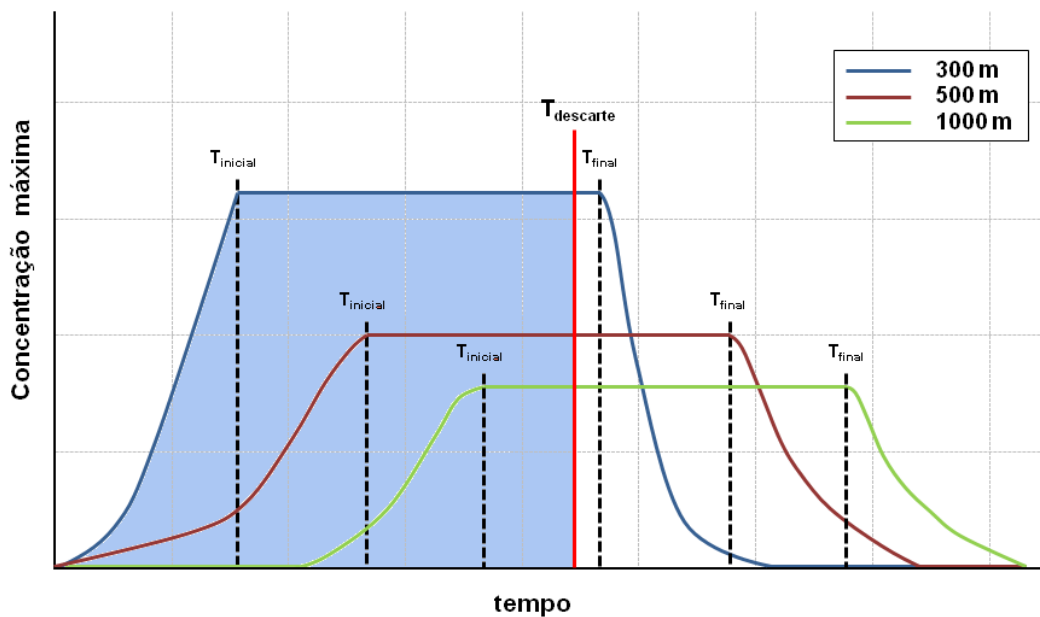


Figura 18: Representação esquemática da condição quase-estacionária do efluente. A área destacada representa o tempo de duração do descarte e as linhas coloridas, as distâncias da fonte.

Na representação esquemática apresentada acima, é possível visualizar melhor quando o efluente entra, permanece e sai dessa condição. Independente da distância da fonte, o

efluente tende a aumentar sua concentração com o passar do tempo até um dado momento ($T_{inicial}$). Ao entrar na quase-estacionariedade, as concentrações permanecem constantes até um tempo final (T_{final}), a partir do qual começam a diminuir.

Os tempos iniciais e finais da condição estacionária da pluma foram calculados, para os dois cenários, para distâncias específicas da fonte (Tabela 11).

Tabela 11: Tempo inicial e final (em horas) para cada cenário, em relação à distância da fonte.

distância da fonte (m)	cenário de verão		cenário de inverno	
	tempo inicial (h)	tempo final(h)	tempo inicial (h)	tempo final(h)
10	0,0106	$T_{descarte} + 0,0106$	0,0336	$T_{descarte} + 0,0330$
50	0,0532	$T_{descarte} + 0,0528$	0,1681	$T_{descarte} + 0,1650$
100	0,1063	$T_{descarte} + 0,1057$	0,3361	$T_{descarte} + 0,3300$
200	0,2126	$T_{descarte} + 0,2113$	0,6723	$T_{descarte} + 0,6600$
300	0,3189	$T_{descarte} + 0,3170$	1,0084	$T_{descarte} + 0,9900$
400	0,4252	$T_{descarte} + 0,4227$	1,3445	$T_{descarte} + 1,3200$
500	0,5315	$T_{descarte} + 0,5284$	1,6807	$T_{descarte} + 1,6500$
750	0,7972	$T_{descarte} + 0,7925$	2,5210	$T_{descarte} + 2,4750$
1000	1,0629	$T_{descarte} + 1,0567$	-	-
1500	1,5944	$T_{descarte} + 1,5851$	-	-

5. Resultados

Os resultados apresentados a seguir apresentam, primeiramente, o comportamento da pluma na fase dinâmica, caracterizando o seu posicionamento na coluna d'água, concentração, diluição, temperatura e salinidade. Posteriormente, é analisada a fase passiva, onde são analisados os perfis radiais de concentração decorrentes do descarte.

5.1. Fase Dinâmica

5.1.1 *Posição da Pluma na Coluna d'Água*

Na Figura 19 e na Figura 20, são apresentados os perfis longitudinais e em planta das plumas formadas no cenário de verão e inverno, respectivamente.

Os perfis representam o comportamento da pluma durante a fase dinâmica, indicando a variação do centro de massa e do topo e base da pluma na coluna d'água.

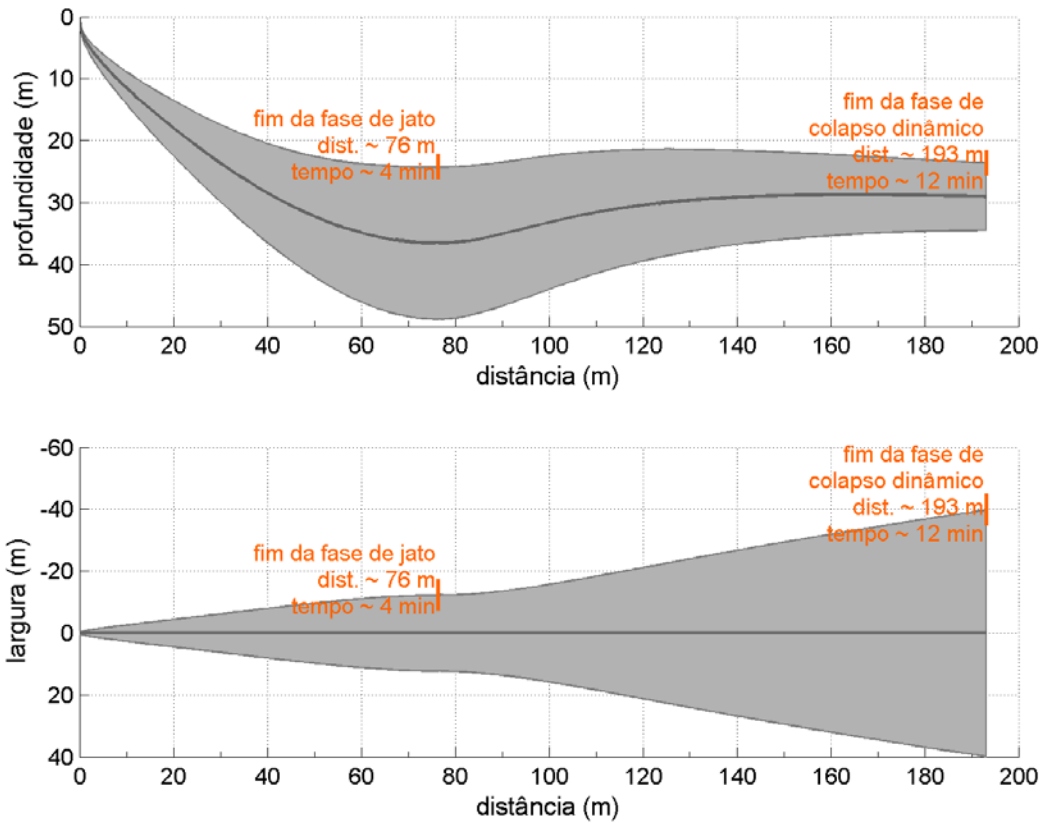


Figura 19: Perfil longitudinal (painel superior) e em planta (painel inferior) obtido na fase dinâmica da pluma, durante o cenário de verão.

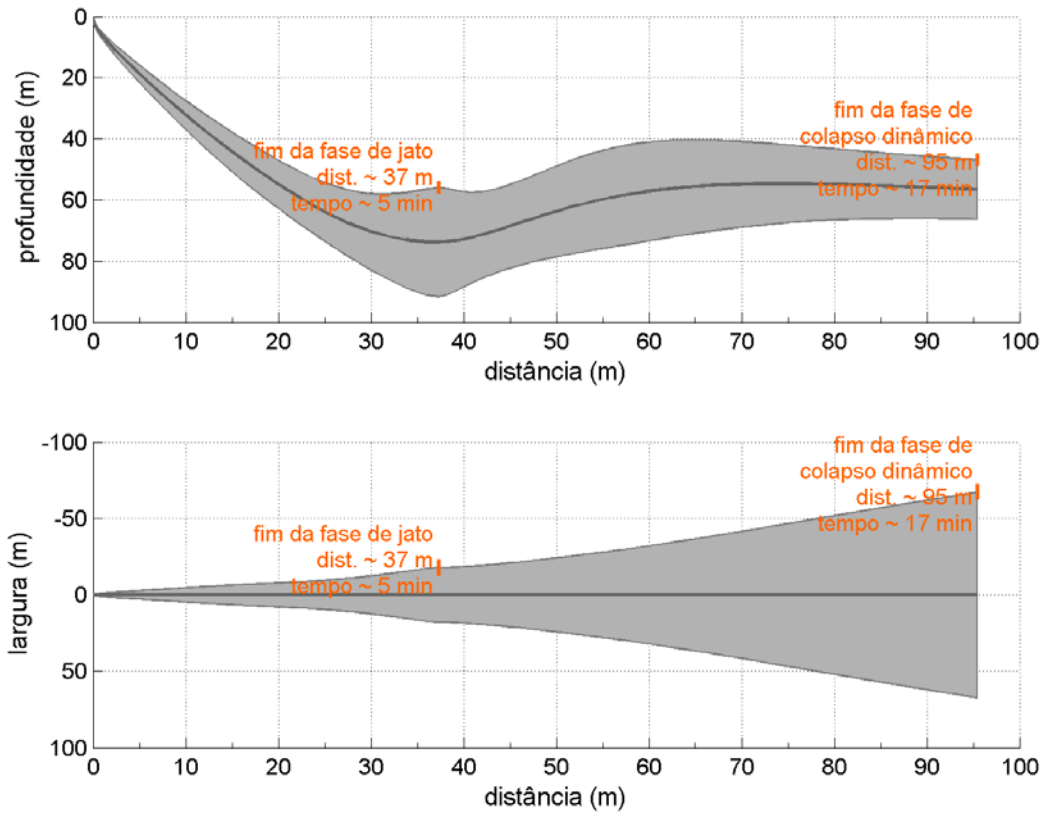


Figura 20: Perfil longitudinal (painel superior) e em planta (painel inferior) obtido na fase dinâmica da pluma, durante o cenário de inverno.

Durante o verão, primeiramente, a pluma apresenta um movimento descendente e sua base alcança a profundidade máxima de 48,9 m. Em seguida, a pluma encontra um nível de flutuação neutra, com o centro de massa próximo aos 36,6 m de profundidade. O término da fase ocorre próximo aos 193,2 m de distância da fonte com uma largura de 79,8 m. No inverno, a pluma apresenta o mesmo comportamento, com sua base atingindo uma profundidade máxima de 91,6 m na fase de jato. O final da fase dinâmica ocorre a uma distância de 95,4 m da fonte, com a pluma atingindo a largura máxima de 134,7 m e o centro de massa a 56,6 m abaixo da superfície.

No verão, a pluma termina a fase dinâmica a uma maior distância da fonte e mais rapidamente (193,2 m - 12 minutos) que no cenário de inverno (95,4 m - 17 minutos).

5.1.2 Concentração e diluição

As curvas de concentração máxima e diluição mínima obtidas durante a fase dinâmica são apresentadas na Figura 21.

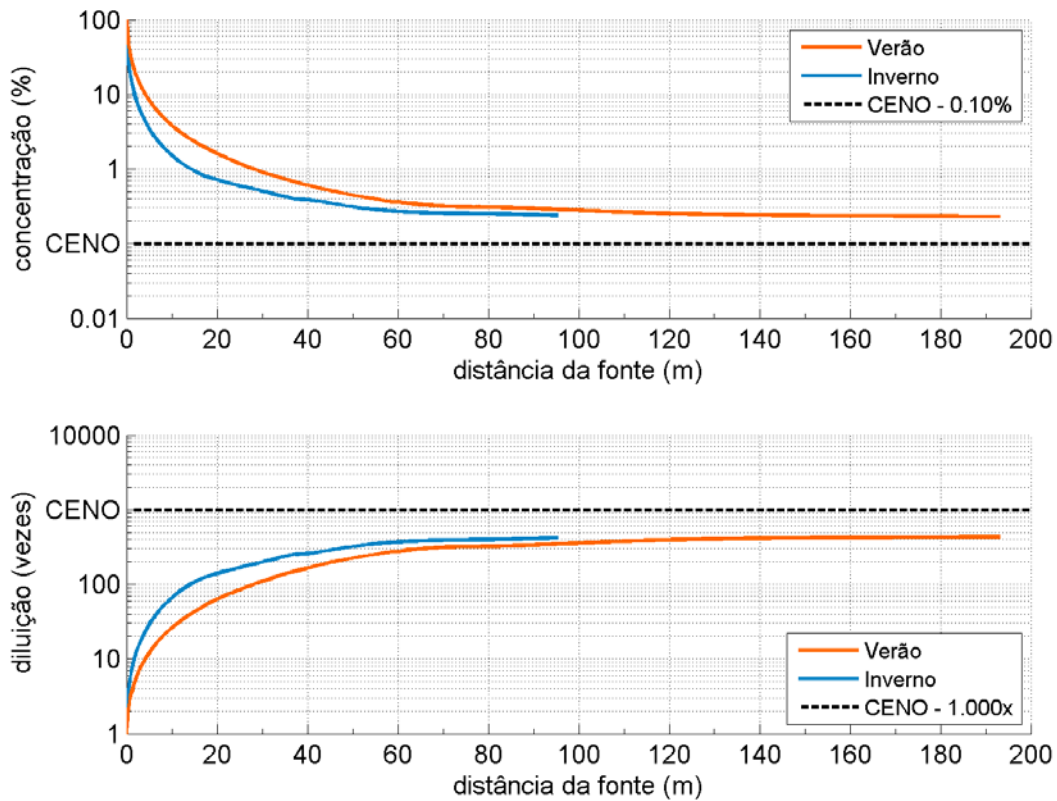


Figura 21: Concentração máxima (painel superior) e diluição mínima (painel inferior) com a distância da fonte durante a fase dinâmica, nos cenários de verão (laranja) e inverno (azul). A linha preta tracejada representa o limiar do CENO.

Ao término da fase dinâmica, o centro de massa da pluma apresenta uma concentração de 0,23% da concentração inicial no cenário de verão, e 0,24% no cenário de inverno. Esses valores correspondem a uma diluição mínima de 436,11 vezes e 420,52 vezes, no cenário de verão e inverno, respectivamente.

5.1.3 Temperatura e salinidade

As variações de temperatura e salinidade do centro de massa da pluma são apresentadas na Figura 22. Nestas figuras, os valores de temperatura e salinidade do ambiente ao final da fase dinâmica são representados pelas linhas pontilhadas.

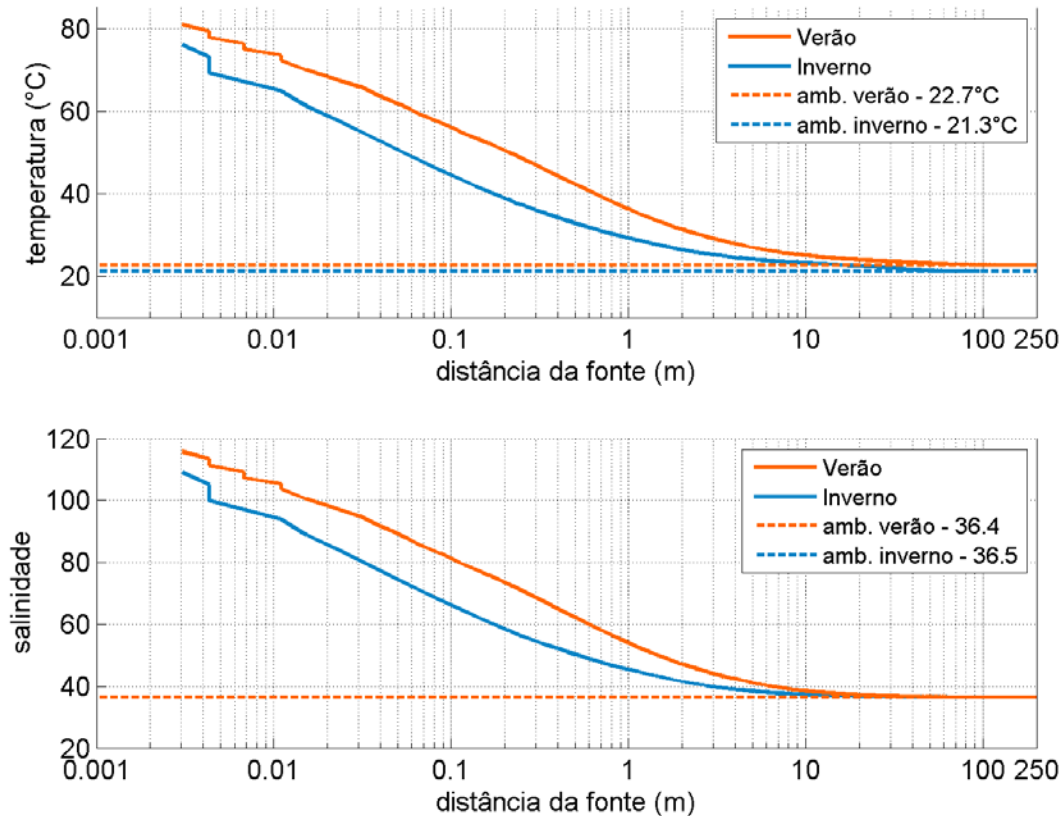


Figura 22: Variação da temperatura (painel superior) e salinidade (painel inferior) com a distância da fonte durante a fase dinâmica, durante o verão (laranja) e o inverno (azul). As linhas tracejadas representam a temperatura e salinidade ambiente ao final da fase dinâmica.

A temperatura e salinidade da pluma apresentam-se mais elevadas no cenário de verão, atingindo valores semelhantes ao do ambiente ao final da fase dinâmica (temperatura de 22,73°C da pluma – 22,7°C do ambiente; salinidade de 36,43 da pluma – 36,4 do ambiente). No cenário de inverno, a pluma também tende a manter características de temperatura e salinidade semelhantes às do ambiente ao final da fase dinâmica (temperatura de 21,32°C da pluma – 21,3°C do ambiente; salinidade de 36,49 da pluma – 36,5 do ambiente).

Um resumo dos resultados obtidos na fase dinâmica pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12: Resultados obtidos na fase dinâmica.

Parâmetros da pluma	unidade	Verão	Inverno
Durante a fase			
Largura máxima da pluma	m	79,83	134,70
Profundidade máxima do centro de massa	m	36,55	73,74
Profundidade máxima da base	m	48,87	91,62
Ao término da fase			
Distância da fonte	m	193,17	95,45
Largura da pluma	m	79,83	134,70
Profundidade do centro de massa	m	29,05	56,56
Profundidade da base	m	34,52	66,31
Concentração	%	0,23	0,24
Diluição	vezes	436,11	420,52
Temperatura	°C	22,73	21,32
Salinidade	-	36,43	36,49
Duração da fase	min	11,79	16,66

Comparando os cenários, percebe-se que, durante o inverno, a pluma atinge maiores profundidades, apresentando uma maior largura e alcançando uma menor distância da fonte, ao final da fase dinâmica.

Em relação à concentração, o maior valor obtido ao término da fase dinâmica (0,24 %) ocorreu no cenário de inverno.

5.2. Fase Passiva

Durante a fase dinâmica, o limiar do CENO de 0,10% da concentração inicial não foi atingido, como pode ser visualizado na Tabela 13. Desta forma, a fase passiva da pluma também foi modelada.

Tabela 13: Valores de concentração e diluição desejados e os valores obtidos ao término da fase dinâmica.

Parâmetro	Valores desejados	Valores obtidos ao término da fase dinâmica	
		Cenário de Verão	Cenário de Inverno
Concentração	0,10%	0,23%	0,24%
Diluição	1.000x	436,11x	420,52x

5.2.1 Perfil longitudinal de concentração do centro de massa da pluma

Para verificar a variação da concentração do efluente com a profundidade e o distanciamento do ponto de descarte, foram extraídos perfis longitudinais no centro de massa das plumas. Os limiares foram monitorados de acordo com a concentração máxima ao longo da trajetória.

A pluma foi monitorada em 3 momentos distintos:

- (1) Logo após o início do descarte e antes de alcançar a condição estacionária;
- (2) Durante a condição estacionária, e;
- (3) Após o término do descarte.

5.2.1.1 Cenário de Verão

Da Figura 23 à Figura 24 são apresentados perfis longitudinais da pluma no cenário de verão após 30 minutos e 1 hora do **início** do descarte. Nestes momentos a pluma ainda não atingiu a estacionariedade.

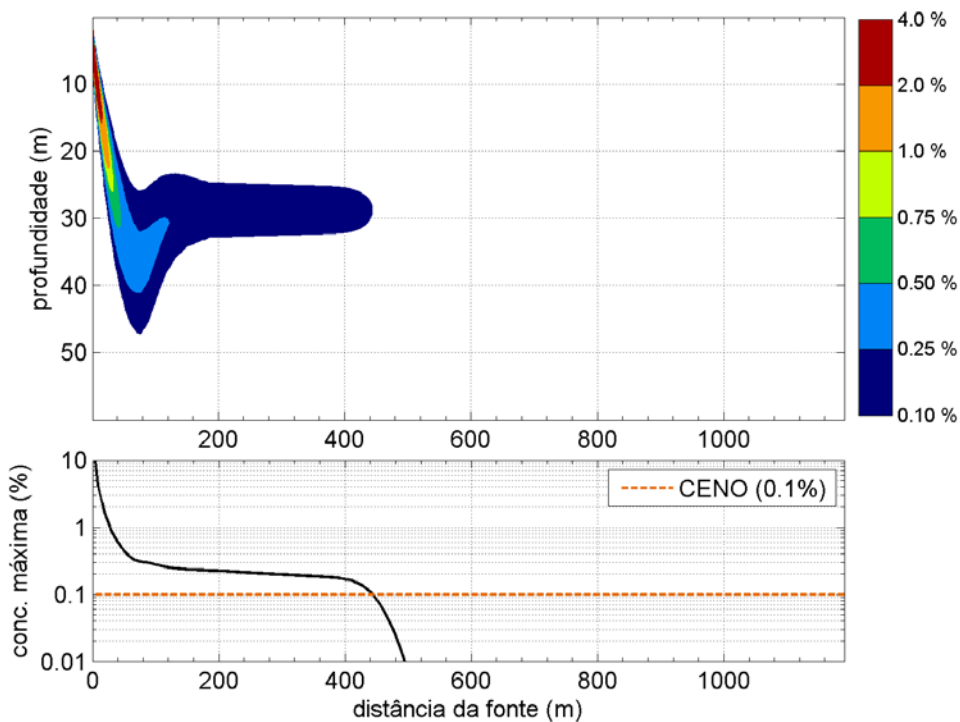


Figura 23: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido 30 minutos após o início do descarte, no cenário de verão.

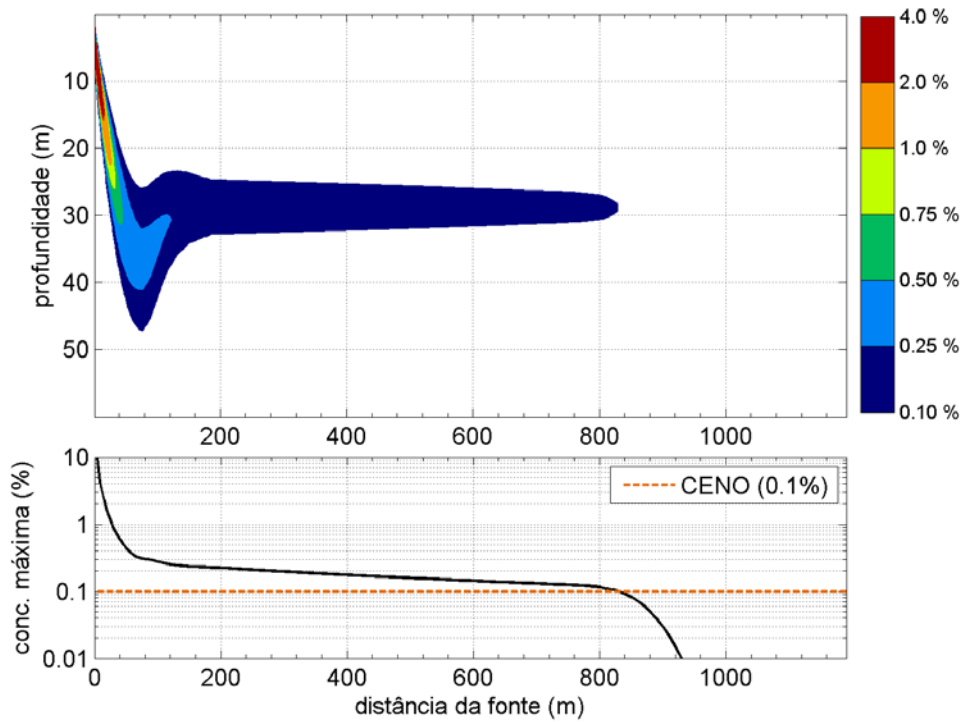


Figura 24: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido 1 hora após o início do descarte, no cenário de verão.

Como já observado na fase dinâmica, a pluma fica restrita aos primeiros 50 m da coluna d'água. Após 1 hora e 30 minutos do início do descarte, a pluma atinge a condição estacionária, distanciando-se, aproximadamente, 1.041 m da fonte.

Na Figura 25, é apresentado o perfil longitudinal da pluma, no cenário de verão, **durante a condição estacionária.**

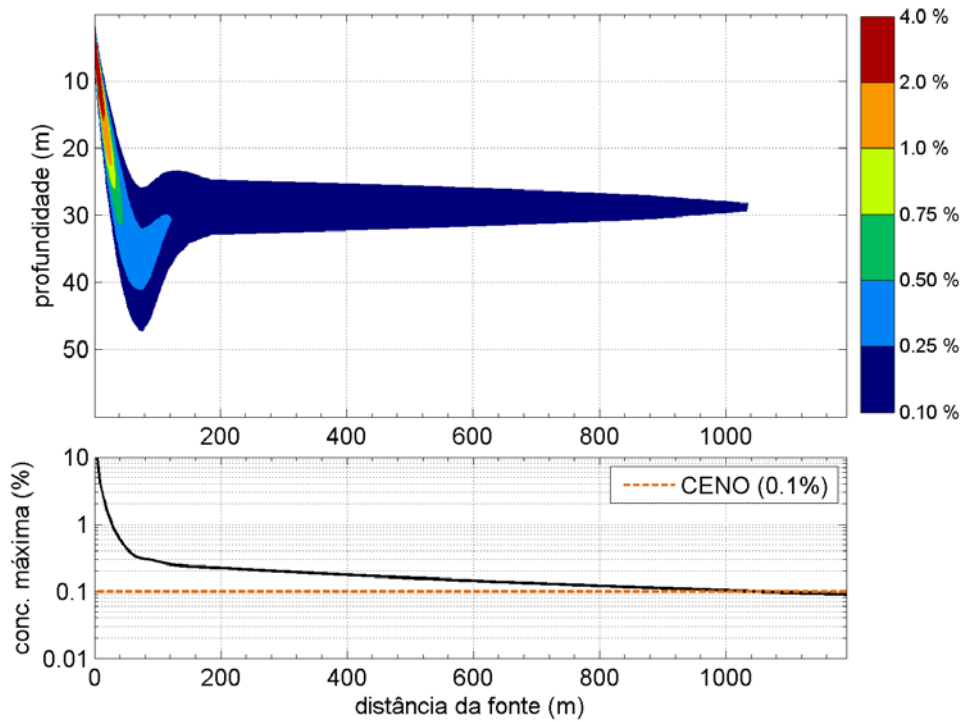


Figura 25: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido durante a condição estacionária da pluma, no cenário de verão.

Durante o estado estacionário da pluma, o limiar do CENO é atingido a 1.041 m da fonte. Do início da estacionariedade até o fim do descarte, a pluma mantém o mesmo comportamento e concentrações.

Os perfis extraídos após 30 minutos e 1 hora do **término** do descarte estão apresentados da Figura 26 à Figura 27, respectivamente.

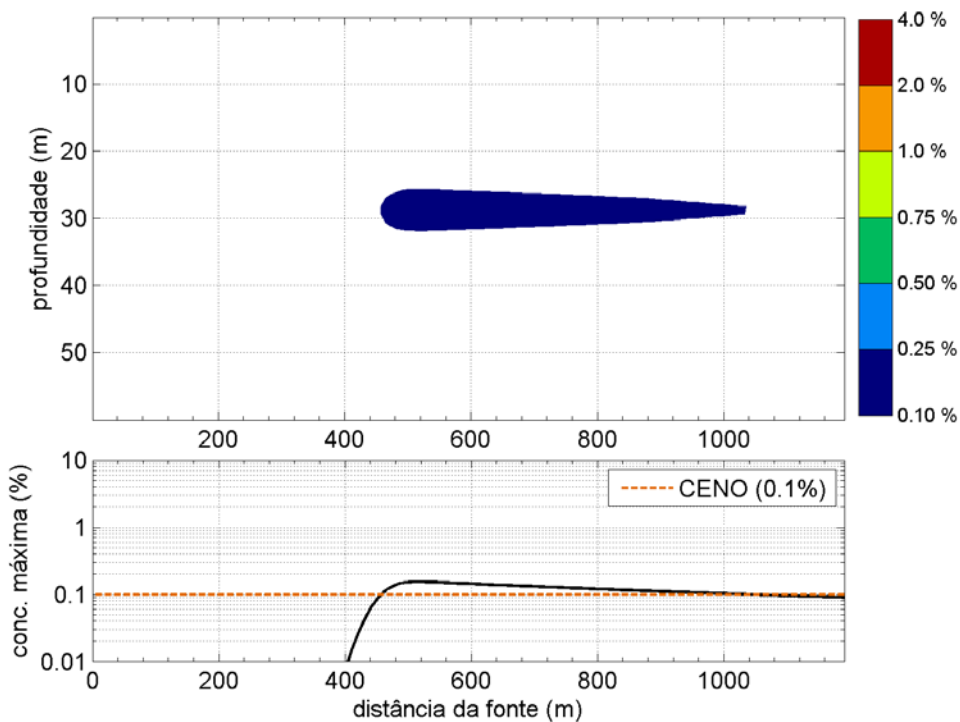


Figura 26: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido 30 minutos após o término do descarte, no cenário de verão.

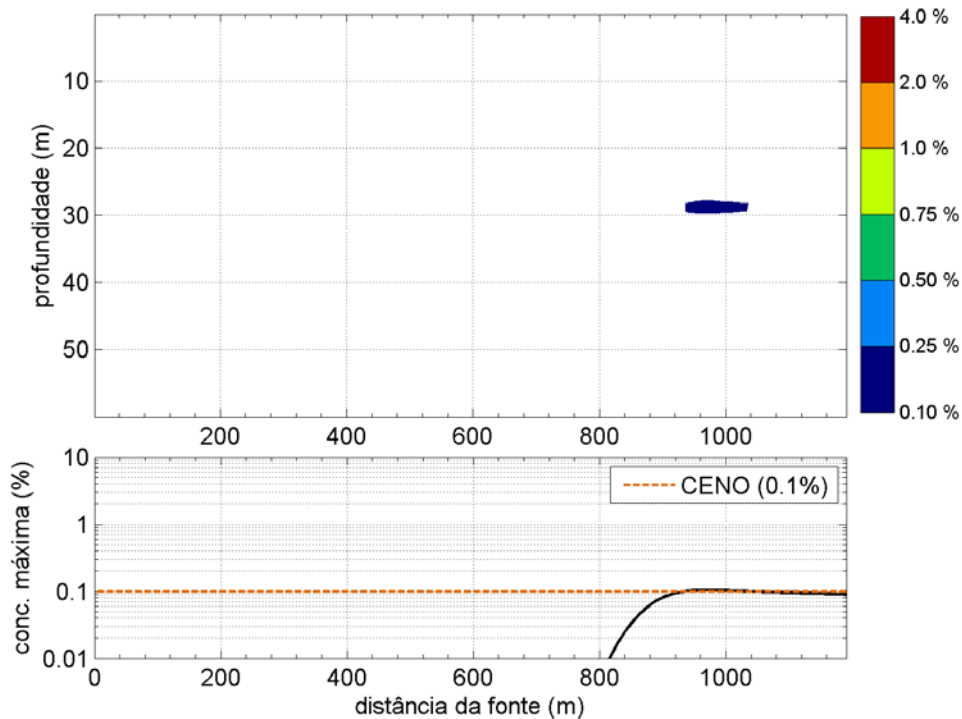


Figura 27: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido 1 hora após o término do descarte, no cenário de verão.

Após o término do descarte, a pluma passa a ocupar menores profundidades, sendo essas inferiores a 30 m. A distância da fonte alcançada pelo limiar do CENO mantém-se a mesma que a obtida antes do fim do descarte (1.041 m). Uma hora e meia após o término do descarte não são mais notadas concentrações acima do CENO.

Na Tabela 14, são mostradas as distâncias em que o índice de toxicidade CENO (0,10 %) é alcançado, no cenário de verão.

Tabela 14: Distâncias da fonte onde o índice de toxicidade (CENO) é alcançado, de acordo com o tempo simulado no cenário de verão.

tempo	distância da fonte (m) cenário de verão
(início + 30 min)	445,10
(início + 1 hora)	831,00
Condição estacionária	1041,00
(fim + 30 min)	1041,00
(fim + 1 hora)	1041,00

5.2.1.2 Cenário de Inverno

Da Figura 28 à Figura 30 são apresentados perfis longitudinais da pluma no cenário de inverno após 30 minutos, 1 hora e 3 horas do **início** do descarte. Neste momento, a pluma ainda não atingiu a estacionariedade.

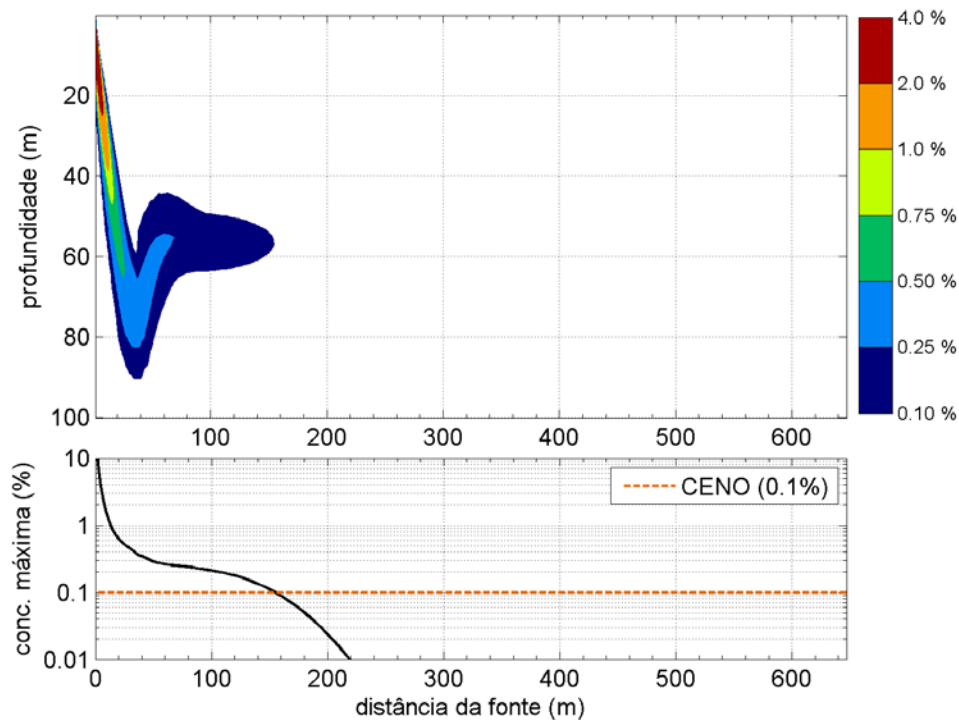


Figura 28: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido 30 minutos após o início do descarte, no cenário de inverno.

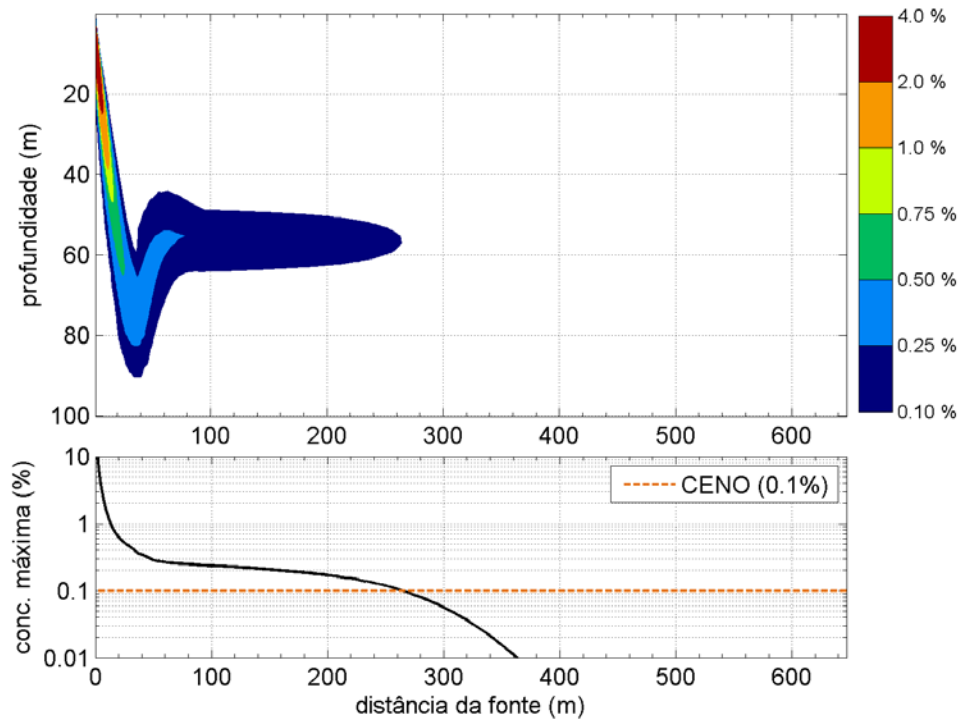


Figura 29: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido 1 hora após o início do descarte, no cenário de inverno.

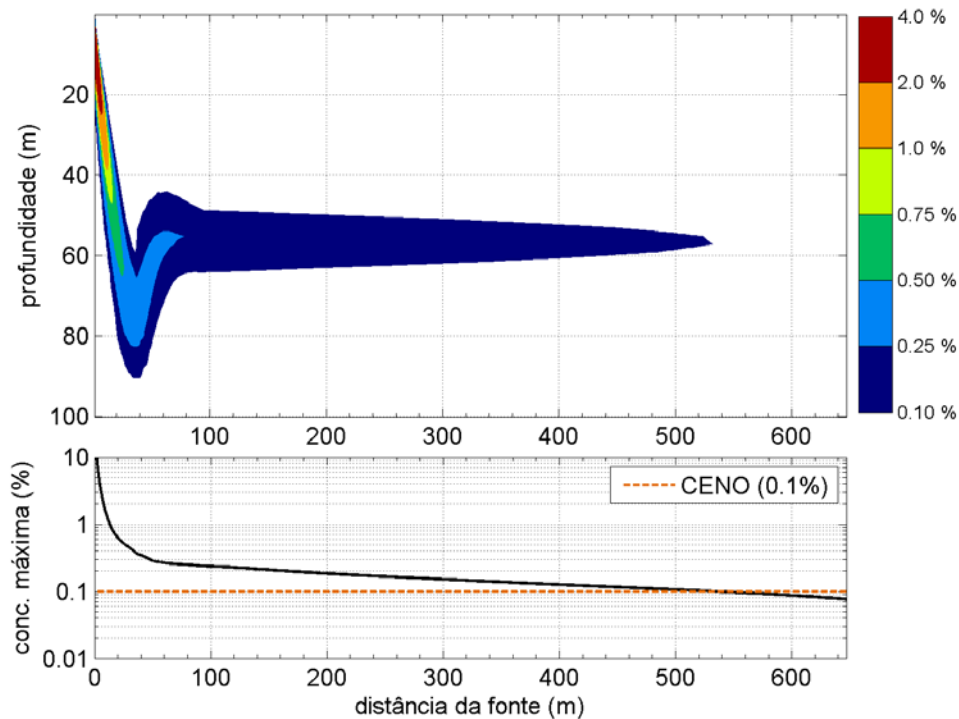


Figura 30: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido após 3 horas após o início do descarte, no cenário de inverno.

A pluma fica restrita aos primeiros 90 m da coluna d'água. Após 3 horas do início do descarte, a pluma atinge a condição estacionária, distanciando-se, aproximadamente, 542,5 m da fonte.

Na Figura 31 é apresentado o perfil longitudinal da pluma, no cenário de inverno, **durante a condição estacionária.**

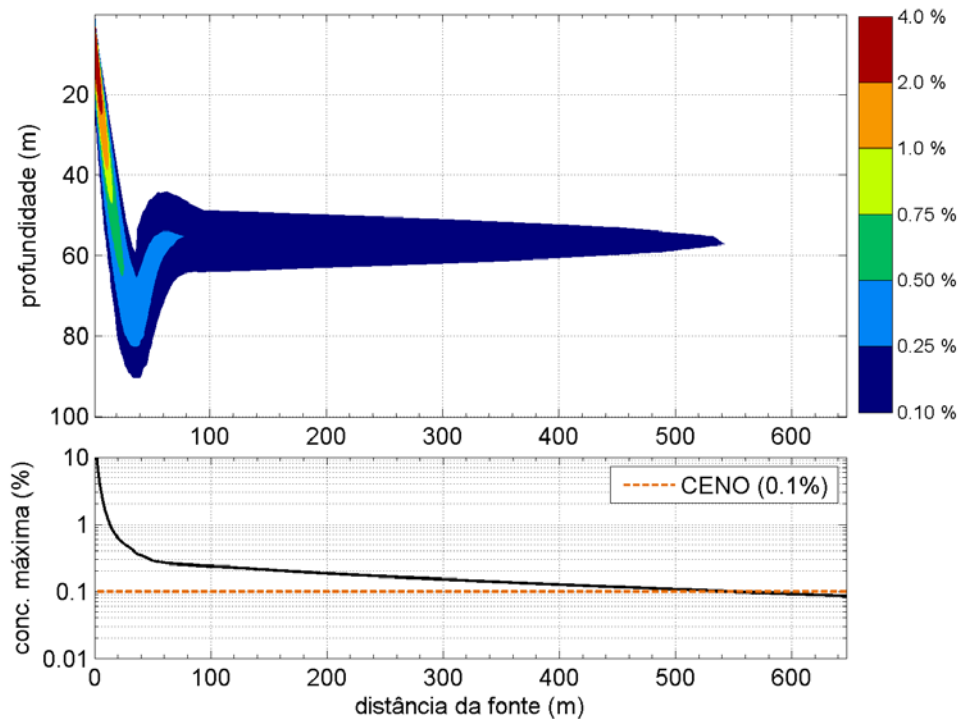


Figura 31: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido durante a condição estacionária da pluma, no cenário de inverno.

Durante o estado estacionário da pluma, o limiar do CENO é atingido a 542,47 m da fonte. Do início da estacionariedade até o fim do descarte, a pluma mantém o mesmo comportamento e concentrações.

Os perfis extraídos após 30 minutos e 1 hora do **término** do descarte estão apresentados da Figura 32 à Figura 33, respectivamente.

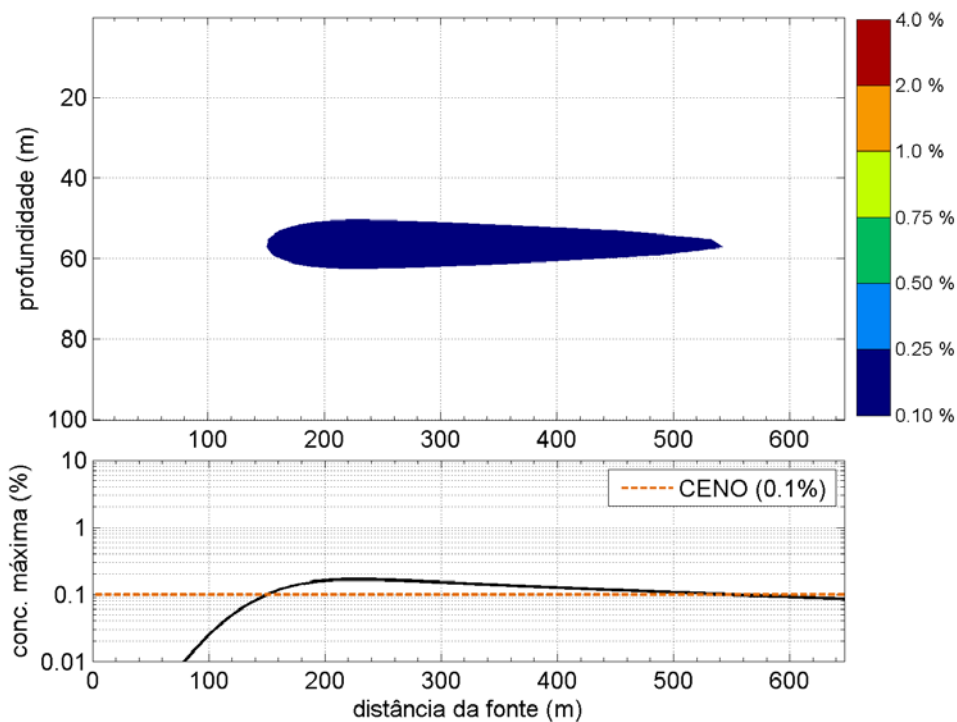


Figura 32: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido 30 minutos após o término do descarte, no cenário de inverno.

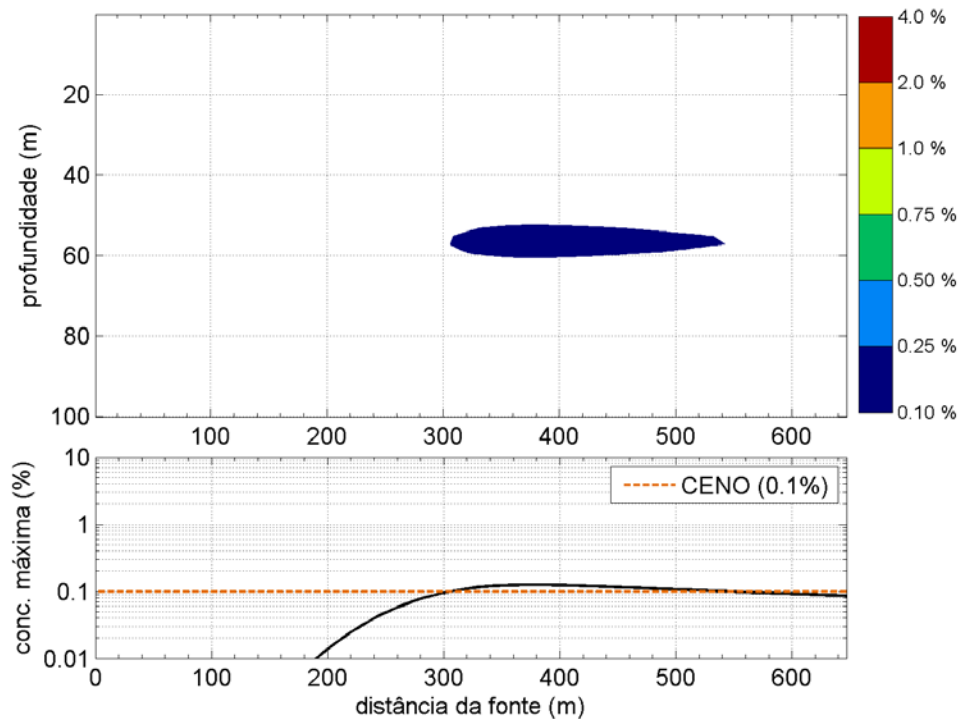


Figura 33: Variação da concentração com a profundidade e a distância da fonte (painel superior) e variação da concentração máxima com a distância da fonte (painel inferior). Resultado obtido 1 hora após o término do descarte, no cenário de inverno.

Após o término do descarte, a pluma passa a ocupar menores profundidades, sendo essas inferiores a 60 m. A distância da fonte alcançada pelo limiar do CENO mantém-se a mesma que a obtida antes do fim do descarte (542,47 m). Uma hora e 30 minutos após o término do descarte não são mais notadas concentrações acima do CENO.

Na Tabela 15 são mostradas as distâncias em que o índice de toxicidade CENO (0,10 %) é alcançado, no cenário de inverno.

Tabela 15: Distâncias da fonte onde o índice de toxicidade (CENO) é alcançado, de acordo com o tempo simulado no cenário de inverno.

tempo	distância da fonte (m) cenário de inverno
(início + 30 min)	154.92
(início + 1 hora)	266.13
(início + 3 horas)	532.36
Condição estacionária	542.47
(fim + 30 min)	542.47
(fim + 1 h)	542.47
(fim + 1 h e 30 min)	542.47

5.2.1 Perfil radial

Para a observação da variação da concentração em torno do centro de massa da pluma, foram extraídos perfis radiais a determinadas distâncias do ponto de descarte, seguindo o sentido preferencial das correntes.

Os perfis aqui apresentados referem-se aos instantes em que a pluma mantém características estacionárias em toda sua extensão. *Ou seja, essas informações não foram extraídas após o término do descarte.*

É importante ressaltar também, que as escalas horizontais e verticais nas figuras dos perfis radiais não são iguais, devido à maior variação horizontal em decorrência da vertical.

5.2.1.1 Cenário de Verão

A representação esquemática das radiais escolhidas é apresentada na Figura 34. A variação de concentração do descarte de água de produção obtida nos perfis radiais é apresentada da Figura 35 à Figura 36.

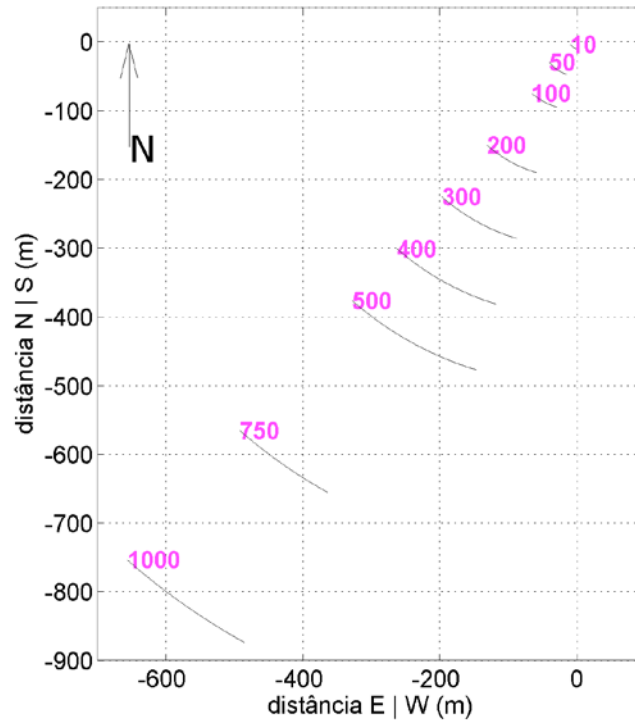


Figura 34: Localização dos perfis radiais da pluma para o cenário de verão.

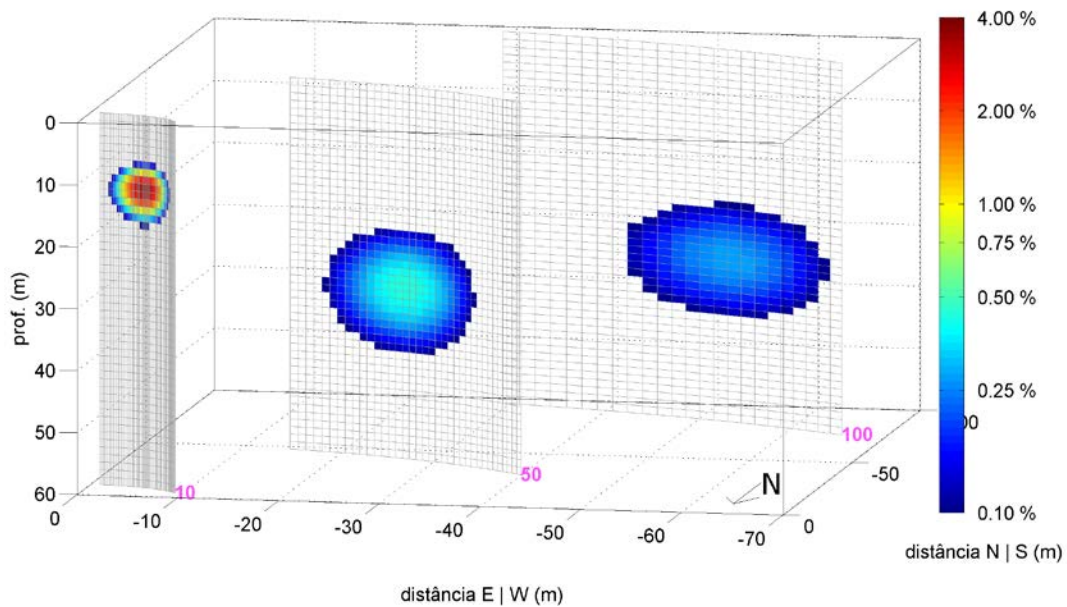


Figura 35: Perfis radiais de concentração decorrentes do descarte de água de produção, no período de verão, até a distância de 100 m.

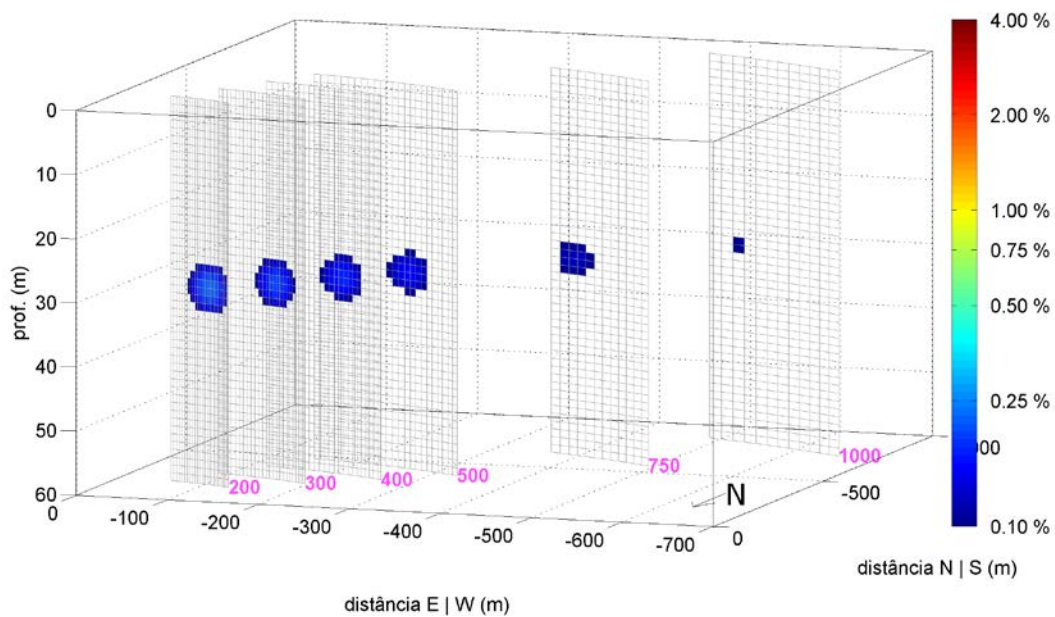


Figura 36: Perfis radiais de concentração decorrentes do descarte de água de produção, no período de verão, de 20 a 1000 m de distância.

A partir da localização dos perfis radiais observa-se uma orientação da pluma para sudoeste, concordando com a hidrodinâmica local, para o período de verão, apresentada na Figura 10. A concentração máxima, de 3,78 % da inicial, é obtida na radial de 10 m, e o limiar CENO (0,10 %) é alcançado após a radial de 1000 m.

Em relação ao comportamento da pluma na coluna d'água, nota-se um movimento descendente da radial de 10 a 50 m, com posterior ascensão na radial seguinte. Na medida em que se distancia da fonte, a pluma passa a ocupar menores profundidades.

A concentração máxima e diluição mínima obtidas pela pluma formada no descarte de água de produção, no cenário de verão, são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16: Concentração máxima (%) e diluição mínima (vezes) da pluma formada no descarte de água de produção, em cada radial do cenário de verão.

distância da fonte (m)	concentração máxima (%)	diluição mínima (vezes)
10	3,785	26,419
50	0,447	223,735
100	0,278	359,096
200	0,224	446,742
300	0,197	507,187
400	0,176	568,874
500	0,158	633,742
750	0,124	803,490
1000	0,102	984,717
1500	<0,10	>1000

5.2.1.2 Cenário de Inverno

A representação esquemática das radiais escolhidas é apresentada na Figura 37. A variação de concentração do descarte de água de produção obtida nos perfis radiais é apresentada da Figura 38 à Figura 39.

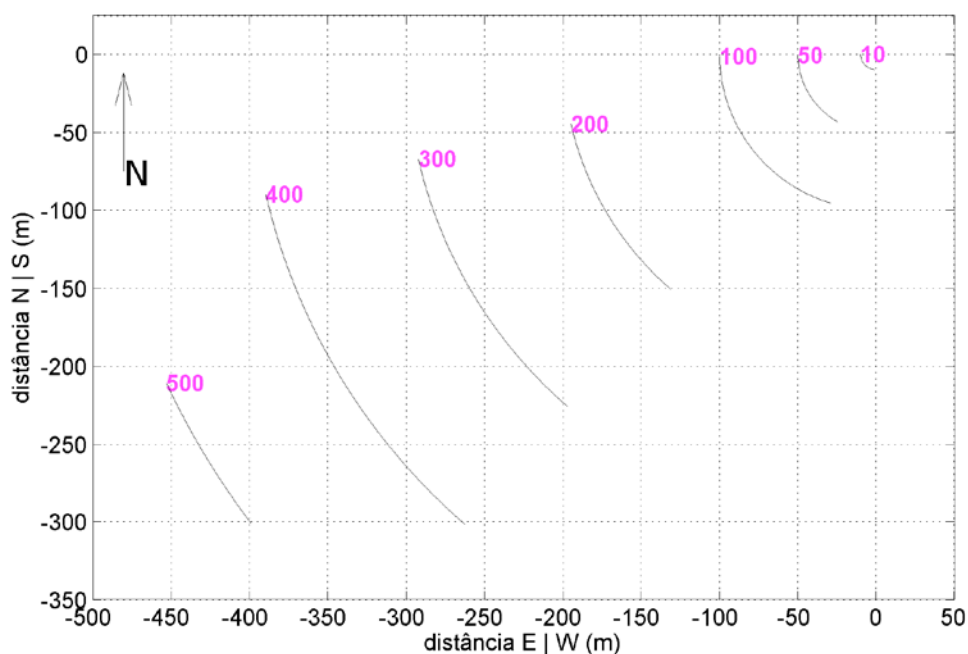


Figura 37: Localização dos perfis radiais da pluma para o cenário de inverno.

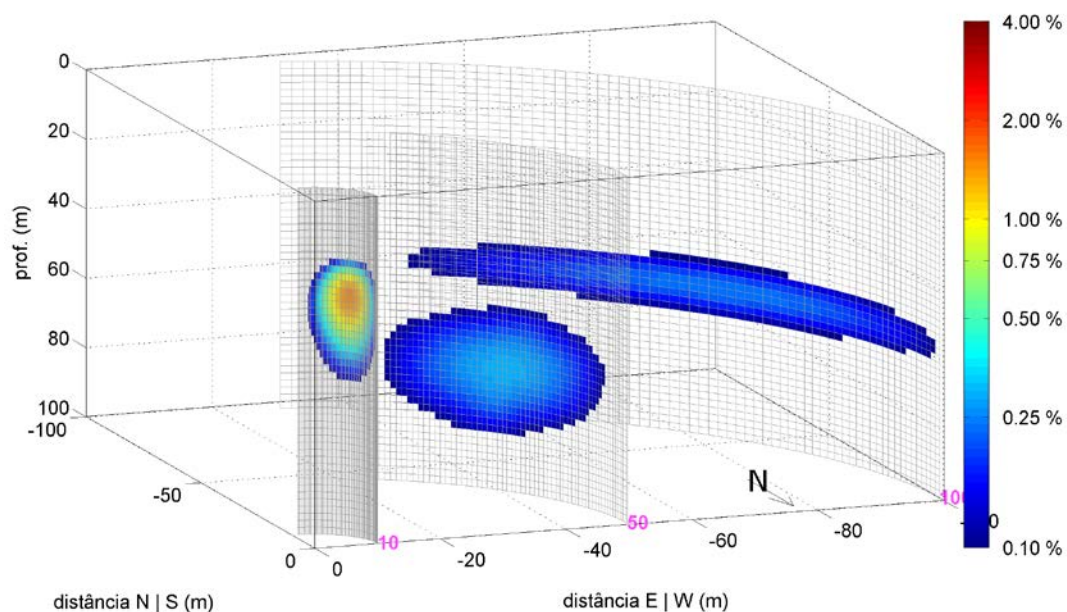


Figura 38: Perfis radiais de concentração decorrentes do descarte de água de produção no período de inverno, até a distância de 100 m.

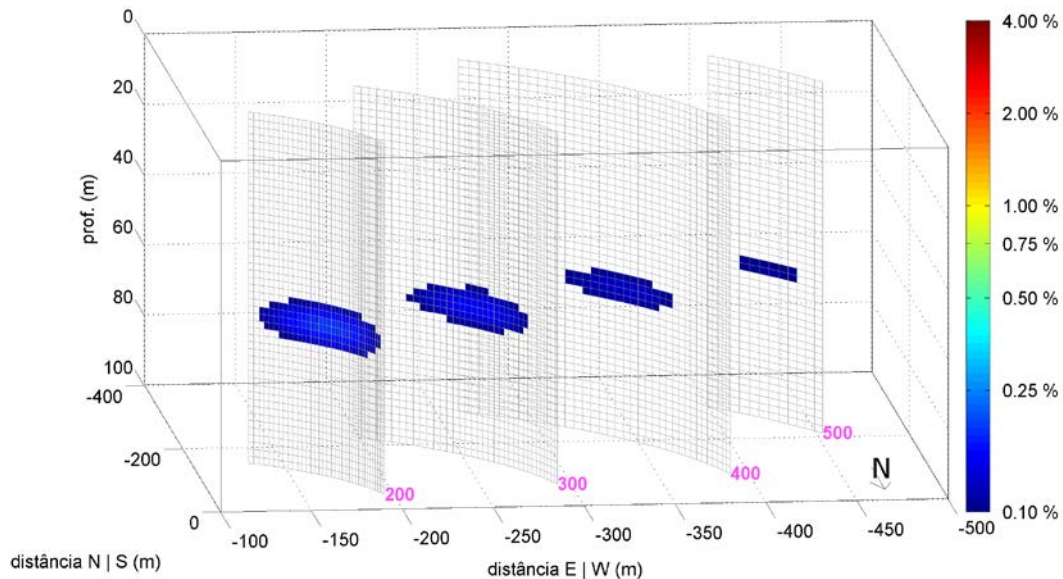


Figura 39: Perfis radiais de concentração decorrentes do descarte da água de produção no período de inverno, de 200 a 500 m.

Assim como no cenário de verão, a pluma se orienta para sudoeste, seguindo a hidrodinâmica local. A concentração máxima, de 1,56 % da inicial, é observada na radial de 10 m e o limiar monitorado só é atingido após a radial de 500 m.

A maior profundidade alcançada pela pluma é observada na radial de 50 m, com a base da pluma a uma profundidade de, aproximadamente, 80 m da superfície. Ao se distanciar da fonte, a pluma tende a ocupar menores profundidades.

A concentração máxima e diluição mínima obtidas pela pluma formada no descarte de água de produção, no cenário de inverno, são apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17: Concentração máxima (%) e diluição mínima (x) da pluma formada no descarte de água de produção, em cada radial do cenário de inverno.

distância da fonte (m)	concentração máxima (%)	diluição mínima (vezes)
10	1,564	63,935
50	0,293	341,636
100	0,236	423,741
200	0,184	542,655
300	0,150	664,659
400	0,126	794,313
500	0,106	941,930
750	<0.10	>1000

5.3. Fase Dinâmica + Fase Passiva

Segundo a Resolução CONAMA nº 393/07, **Zona de Mistura** é a região do corpo receptor onde ocorre a diluição inicial do efluente, sendo delimitada a um raio de 500 m do ponto de descarte. Entende-se, pelas normas estabelecidas nessa Resolução, que os limiares monitorados devem se restringir a essa zona. Por isso, juntamente com as informações de concentração máxima e diluição mínima do efluente, é apresentado o limite da Zona de Mistura para uma melhor avaliação do cenário ambiental.

De forma a resumir os resultados obtidos nas duas fases apresentadas (dinâmica e passiva), é apresentada na Figura 40 a variação da concentração máxima e da diluição mínima da pluma do descarte de água de produção com a distância da fonte.

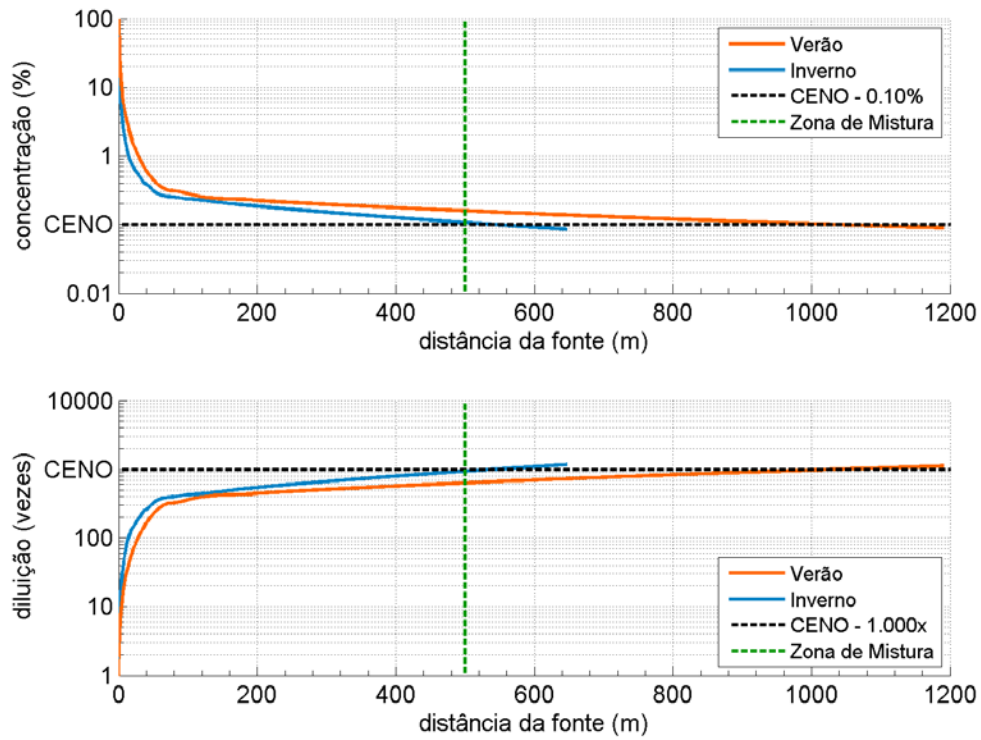


Figura 40: Concentração máxima (painel superior) e diluição mínima (painel inferior) da pluma com a distância da fonte após a fase passiva, nos cenários de verão (laranja) e inverno (azul).

No cenário de verão, a concentração de 0,10% da inicial é atingida a 1.041 m da fonte, e no inverno a 542,57 m. Ou seja, em ambos os cenários o limiar é atingido fora da Zona de Mistura.

6. Conclusões

Neste estudo foi realizada a análise do comportamento da pluma de água produzida a ser descartada durante as operações no bloco BM-C-41, na Bacia de Campos. Foi analisada, especificamente, a variação da concentração do fluido em relação à distância da fonte e à profundidade, verificando-se a distância da fonte na qual é atingido o limiar monitorado.

Com base nas características meteo-oceanográficas da região, dois cenários sazonais foram considerados: verão, abrangendo os meses de setembro a fevereiro; e inverno, para os meses de março a agosto. As características do descarte foram as mesmas em ambos os cenários, com o efluente sendo descartado continuamente a uma vazão de 894,30 m³/h.

Foi fornecido pela contratante o limiar de toxicidade a ser monitorado durante o descarte – CENO, com um nível percentual de concentração de 0,10%.

O modelo utilizado neste trabalho foi o OOC (*Offshore Operators Committee*), que simula o comportamento da pluma de efluente em duas fases principais da pluma: a dinâmica e a passiva.

Os resultados da fase dinâmica indicaram que, no cenário de inverno a pluma atinge maiores profundidades (91,62 m) com um maior espalhamento lateral (134,70 m), em relação ao cenário de verão (48,87 m de profundidade e 79,83 m de espalhamento lateral). É neste cenário que a fase termina mais próxima à fonte (95,45 m) e apresenta uma maior concentração (0,24%).

Como o limiar de toxicidade não foi alcançado durante a fase dinâmica, a fase passiva também foi monitorada. Durante o cenário de inverno, a pluma alcançou o limiar monitorado a uma menor distância da fonte (542,47 m), em relação ao verão (1.041 m). Em ambos os cenários, o limiar foi alcançado fora da Zona de Mistura.

Desta forma, apesar de ambos os cenários apresentaram concentrações acima do limiar fora da Zona de Mistura, o cenário de verão é o mais impactante ao meio, por apresentar concentrações mais elevadas a uma maior distância da fonte.

7. Bibliografia

- BLECK, R. An Oceanic General Circulation Model Framed in Hybrid Isopycnic-Cartesian Coordinates. **Ocean Modelling**, v. 37. pp, 55-88, 2002.
- BRANDSMA, M.; SMITH, J. Offshore Operators Committee Mud and Produced Water Discharge Model Report and User Guide, Report and User Guide, Exxon Production Research Company, 1999.
- 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 termobaricity. **Journal Physical Oceanography**, v. 33, n. 12, pp. 2504-2526, 2003.
- DIAS, G. J. 2005, **Modelagem tridimensional do lançamento de rejeitos das atividades de exploração e produção de petróleo em águas profundas**. Tese de Doutorado, - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- EMERY, W. J.; THOMSON, R. E. Data analysis methods in physical oceanography, 2nd and Revised Edition, **Elsevier Science BV**, 638 pp., Amsterdam, 2004.
- GABIOUX, M. **Estudo Numérico dos meandros e vórtices da corrente do Brasil entre 22°S e 30°S**, Tese de Doutorado em Ciências, Área de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008.
- HYCOM, 2011. Assimilative Global Simulation, [online] Disponível via WWW. URL: [.http://hycom.coaps.fsu.edu:8080/thredds/dodsC/glb_analysis](http://hycom.coaps.fsu.edu:8080/thredds/dodsC/glb_analysis). Acessado em julho de 2011.
- KALNAY, E. M. *et al.* The NCEP /NCAR 40-Year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, pp. 437-470, 1996.
- KISTLER, R. *et al.* The NCEP-NCAR 50 Year Reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82, pp. 247-267, 2001.
- KOH, R. C. Y.; CHANG, Y. Mathematical Model for Barge Ocean Disposal of Wastes. Relatório EPA-6602-73-029, U.S. Environmental Protection Agency, Corvallis, Oregon, 1973.
- NCEP, 2011. REANÁLISES II, [online] Disponível via WWW. URL: <http://www.cdc.noaa.gov/data/reanalysis/reanalysis.shtml>. Acessando em julho de 2011.

-
- PINHO, U. F. **Caracterização dos Estados de Mar na Bacia de Campos**. Tese de Mestrado do Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.123 pp., 2003,
- STRAMMA, L.; ENGLAND, M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. C9, pp. 20.863–20.883, 1999.
- VIOLANTE-CARVALHO, N. **Investigação sobre a Evolução do Clima de Ondas na Bacia de Campos e a Correlação com as Situações Meteorológicas Associadas**. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 186 pp., 1998.