

## MODELAGEM DE DERRAME DE ÓLEO

### 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Considerando a necessidade de se avaliar a segurança do meio ambiente durante as operações das plataformas SS P-40 e FSO P-38, ambas localizadas no Campo de Marlim Sul da Bacia de Campos Figura 1-1, foi realizada uma modelagem probabilística de derrame de óleo com vistas a validar os procedimentos de emergência em caso de derrames acidentais.

A modelagem probabilística do derrame foi desenvolvida para os 2 (dois) cenários escolhidos para atender aos critérios do IBAMA no Termo de Referência ELPN/IBAMA Nº 039/99, ou seja, grandes volumes com baixa frequência e pequenos volumes<sup>5</sup> com alta frequência. Desta forma, em APP realizada para o presente empreendimento, foram identificadas e selecionadas as duas hipóteses acidentais a seguir, com volumes distintos de derrame:

**Hipótese acidental Nº 10:** Liberação grande quantidade de óleo no mar devido à ruptura da linha de transferência entre a SS P-40 e a FSO P-38 no trecho 1-5;

Quantidade estimada aproximada: caso mais conservativo é o derrame do conteúdo de 5700 m da linha de 10" de óleo entre a SS P-40 e a FSO P-38, equivalentes a 290 m<sup>3</sup>.

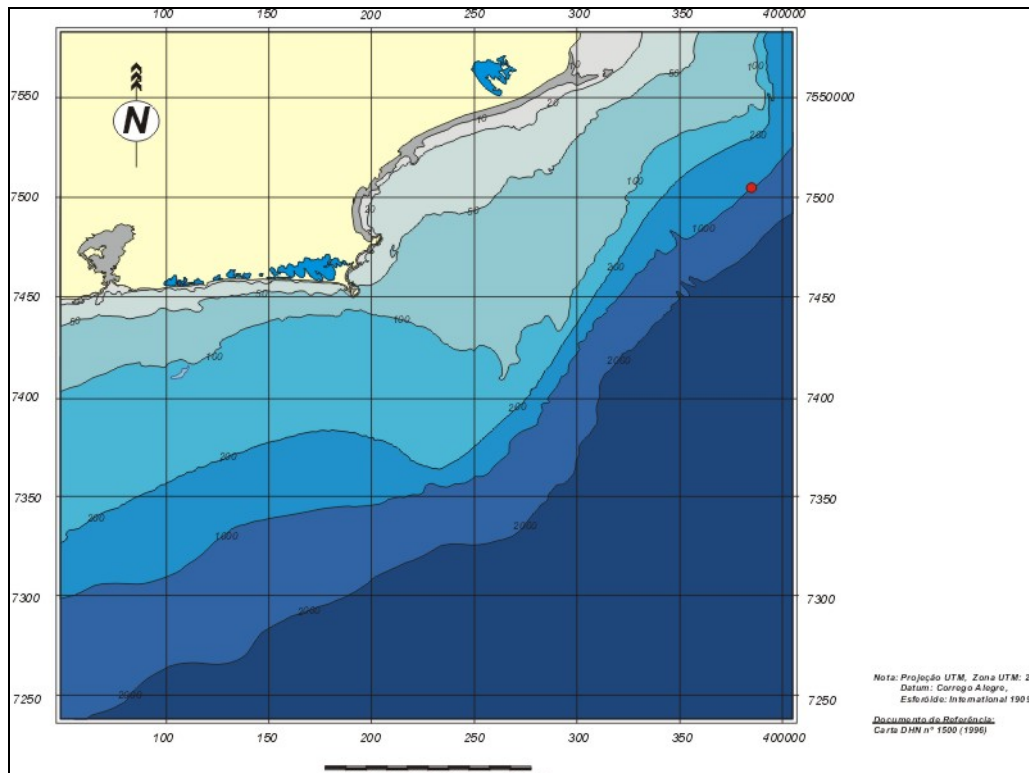
**Hipótese acidental Nº 240:** Liberação de grande quantidade de óleo no mar devido à ruptura de tanque da FSO P-38 causada por contato com embarcação (p.ex. navio aliviador, navio *supply* etc) no trecho 12-4;

Quantidade estimada aproximada: caso mais conservativo é o derrame do conteúdo armazenado em dois tanques de armazenamento da FSO P-38, equivalentes a 46.000 m<sup>3</sup>.

O conhecimento dos regimes de ventos e correntes, na área da plataforma e das características do óleo produzido nesta região, forneceu o embasamento necessário, para a criação da grade de sensibilidade e a utilização do modelo probabilístico de derrame de óleo, cuja descrição da metodologia, procedimentos operacionais e resultados serão apresentados e discutidos neste relatório.

---

<sup>5</sup> Os cenários mais frequentes na verdade envolvem volumes inferiores a 3 m<sup>3</sup> que não são representativos para realização de simulações. Por esta razão, o estudo das consequências envolveu os dois casos de volumes vazados mais conservativos (hipóteses 10 e 240).



**Figura 1-1: Mapa batimétrico da região da Bacia de Campos e adjacências, com a localização do vazamento (círculo vermelho).**

## 2 -METODOLOGIA

A metodologia adotada está baseada na utilização do modelo matemático OSTA, descrito em *The Oilspill Risk Analysis Model of the U.S. Geological Survey*, podendo ser avaliado em SMITH *et alli* (1982) que realiza a análise de impacto considerando o tempo de simulação, a classe e volume de óleo vazado e o local de vazamento. Para efeito da determinação do tempo de simulação foi consideradas a persistência do óleo com a utilização do modelo ADIOS utilizado pela *U.S National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA*, que pode ser apreciado em ADIOS/NOAA (1994).

Com base no uso desses dois modelos, será possível estimar a propagação da mancha de óleo e a probabilidade de toque das áreas sensíveis, para cada hipótese acidental com derrame de determinado tipo de óleo.

Analisando-se a evolução de cada uma destas trajetórias, define-se a probabilidade de cada alvo ser impactado, a partir do cálculo do percentual de vezes que aquele determinado alvo é atingido pela trajetória da mancha de óleo em cada rodada do modelo.

As trajetórias dos derrames são definidas pela posição do baricentro do derrame, que é transportado ao longo da área de estudo pelos processos advectivos, nos quais são consideradas as parcelas do transporte devidas a correntes marinhas e ventos. As funções forçantes que caracterizam as correntes e os ventos são definidas a partir da análise dos dados disponíveis ou modelados para a região, sendo para este fim construídas as matrizes de probabilidade de transição entre diferentes condições de vento, modeladas com base nas séries temporais dos ventos observados na Bacia de Campos.

Os dados de ventos para esta simulação foram obtidos junto ao Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO), fornecidos pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Estes dados foram coletados entre os anos de 1963 a 1997 e foram utilizadas as observações feitas por navios e estações nos quadrados de MARSDEN 375 e 376. Com isto, foi possível analisar o comportamento, numa escala sazonal, do campo de vento para a região.

A partir da estatística de vento da bacia de Campos, avaliou-se 3 condições típicas sazonais (primavera, verão e inverno), para se definir qual seria a condição, cuja direção aparece com maior frequência e maior intensidade para rodada do modelo.

No verão, predominam os ventos de Nordeste e Leste com uma frequência de 27% e 26%, respectivamente. Nestas direções os ventos médios são de 12 e 11 nós (6,1 e 5,6 m/s). Ao longo de todas as direções os ventos variam de 8 a 12 nós (4,1 e 6,1 m/s). Na Figura 2-1 é possível observar as frequências dos ventos entre os anos de 1963 e 1997, bem como as suas intensidades e direções médias ao longo da estação de Verão.

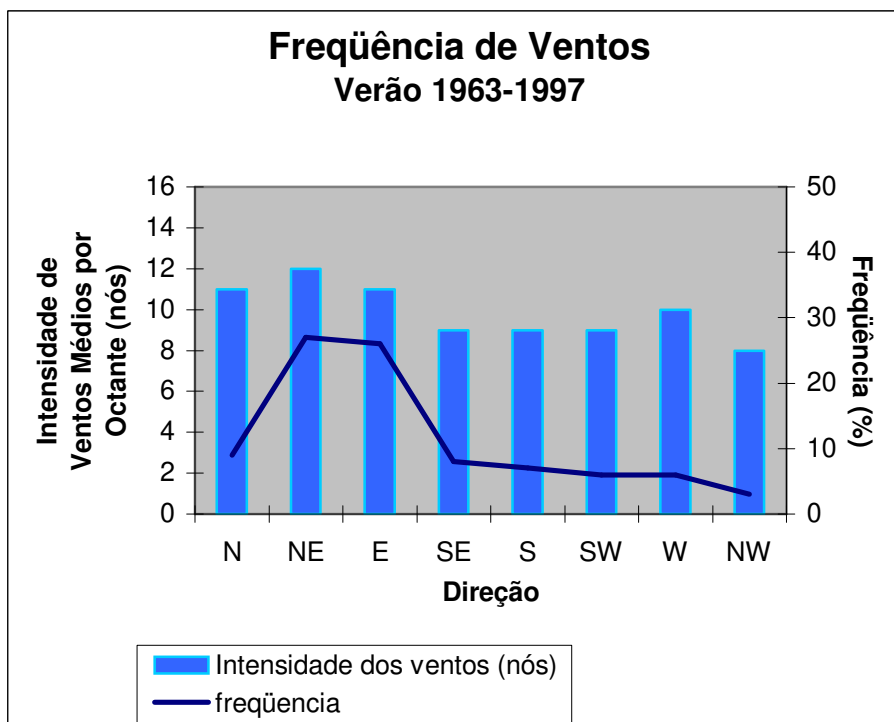


Figura 2-1: Condições de Vento no período de Verão

Para esta modelagem, são analisados os valores de direção e intensidade de ventos a cada intervalo de tempo. Inicialmente, classificam-se os valores medidos em intervalos de direção e intensidade. Posteriormente, verifica-se, para toda a série, as probabilidades de classe de vento sequencial para todas as classes (cenários) de vento utilizadas. No presente caso, foram utilizadas 8 classes de direção (norte, nordeste, noroeste, leste, sul, sudeste, sudoeste e oeste) e 3 classes de intensidade (1 - fraco, 2 - médio, 3 - forte). Os elementos da matriz correspondem às probabilidades de uma classe de vento no instante (t) ser seguida por uma classe de vento no instante (t+1).

Assim sendo, o mês testado e escolhido para rodada do modelo foi Janeiro, pois este mês caracteriza bem a estação de verão no hemisfério sul. A intensidade máxima para esta época do ano foi de 11m/s e a direção do vento de nordeste (direção 45°). Importante salientar que no período de inverno há uma intensificação nas passagens de frentes frias pela região da Bacia de Campos, resultando assim num aumento da freqüência do vento de sudoeste (direção 135°).

Apesar deste aumento das frentes frias nesta época do ano, o tempo de duração da mesma não é suficiente para mudar a direção da mancha de óleo, visto que o vento de sudoeste tem duração de apenas algumas horas ou no máximo um dia. Mesmo que estes sistemas atuantes na região permaneçam por mais tempo, os mesmos não são capazes de mudar a direção característica das correntes na região, o que torna desnecessário uma simulação com estas características.

Durante as simulações com o modelo matemático, a cada passo de tempo é eleita aleatoriamente uma classe de vento baseada na matriz de transição e no vento do passo anterior. As matrizes de transição foram construídas a partir da situação mais crítica, que no caso foi a do mês de janeiro com um de vento máximo de 22 nós (aproximadamente 11 m/s). Entretanto, como comentado anteriormente, pode haver variações intrasazonais, principalmente durante o inverno, quando aumenta a frequência dos ventos de quadrante oeste-sudoeste e até diurnas entre estas duas condições, mas o cenário de direção mais provável é o de ventos leste-nordeste, o que justifica a hipótese da natureza estocástica do processo de cálculo das matrizes de transição.

As simulações são realizadas para intervalos de tempo pré-determinados, sendo que após este período tem-se a definição da área impactada. Elas são interrompidas caso o tempo de simulação se esgote ou o derrame atinja a costa. A definição da duração do tempo de simulação está associada à permanência de concentrações de óleo na água, sendo estas associadas às propriedades físico-químicas do óleo e ao volume derramado.

A metodologia para determinação do tempo de simulação baseou-se na permanência de concentrações de óleo em níveis superiores à LC50 (*lethal concentration*) na coluna d'água e na espessura da camada de óleo remanescente na superfície d'água.

A concentração de óleo na coluna d'água e a espessura de óleo na superfície são calculadas a partir do percentual de óleo dispersado na coluna d'água, determinado pelo modelo ADIOS-NOAA, admitindo-se que a mistura se dá até uma profundidade correspondente à altura de meia onda. Para a entrada do dado de altura de onda foi considerado o caso de ondas em ventos fortes, em que 60% delas tinham alturas significantes de 1,5 m.

Os passos básicos da metodologia adotada são apresentados a seguir.

1. Definição da área em avaliação;
2. Definição das séries de vento e corrente;
3. Discretização da área em avaliação;
4. Definição dos pontos de lançamento e alvos;
5. Elaboração das matrizes de transição;
6. Avaliação da dispersão do óleo na coluna d'água;
7. Definição das hipóteses de simulação;
8. Simulações de análise de risco;
9. Interpretação dos resultados.

**O passo número 1** consiste na definição da área em avaliação. Essa área foi definida como o quadrilátero formado pelas coordenadas UTM Leste 430.000 e 80.000 e pelas coordenadas UTM Norte 7.550.000 e 7.300.000.

**O passo número 2** consiste na eleição das séries de ventos e correntes que irão ser as funções forçantes do modelo. Foram definidas 3 áreas de atuação de correntes e uma área de atuação dos ventos. As correntes foram definidas constantes (de maré de enchente e a Corrente do Brasil), num ciclo de 12 horas (ciclo de corrente de maré semi-diurna) e para os ventos adotou-se uma série com um intervalo de 6 horas entre as medições.

**O passo número 3** consiste na discretização da área em avaliação, foi feita a partir de dois eixos com orientação sul-norte e oeste-leste, com um incremento espacial de 5 km nas duas direções. A malha resultante contém 70 pontos no eixo oeste-leste que variam de 0 a 69. No eixo sul-norte, a malha tem 50 pontos variando de 0 a 49. A origem da malha, ponto (0,0) corresponde às coordenadas UTM (*Datum* Córrego Alegre - Zona 24) leste 80.000 e norte 7.300.000.

**O passo número 4** corresponde à definição do ponto de lançamento. Esse ponto foi definido a partir das coordenadas UTM (*Datum* Córrego Alegre - Zona 24) 384.591 leste (Xi) e 7.504.979 norte (Yi).

**O passo número 5** é a construção das matrizes de transição de ventos, a partir das séries obtidas. Foi construída uma matriz de transição, correspondente à época de verão.

**O passo número 6** consiste na determinação da dispersão do óleo na coluna d'água, com vistas a determinar a LC50 e, desse modo, o tempo de simulação correspondente. Para esta modelagem utilizou-se o óleo com valor de grau API (*American Petroleum Institute*) de 23,4° a uma temperatura média de 25° C, resultando numa densidade de 0,79 g/cm<sup>3</sup>. Também tem que ser considerado o volume vazado e as hipóteses assumidas para a mistura do óleo na coluna d'água, contidas no modelo. As premissas consideradas foram:

- Tempo de simulação do transporte da mancha ao longo da área em avaliação deve ser igual ao tempo em que a concentração do óleo na coluna d'água seja inferior a 5 mg/l no baricentro do derrame e espessura do óleo na superfície inferior à 0,05 mm;
- Volume de óleo na coluna d'água é obtido com a utilização do modelo ADIOS que, em função do tipo de óleo e das características do derrame, apresenta os percentuais de óleo evaporado na coluna d'água e remanescente na superfície durante o tempo de simulação;
- Projeção da área da mancha na superfície e na coluna d'água evolui, no tempo, de acordo com a hipótese de que essa área é equivalente a uma circunferência de raio crescente em função do tempo, da diferença de densidade entre o óleo e a água do mar e do volume do derrame;
- Admitiu-se que a profundidade de mistura do óleo na coluna d'água era equivalente à altura de meia onda característica da região;
- Adotou-se a hipótese de que o óleo se misturava na coluna d'água de acordo com um perfil gaussiano sob a área circular, com uma concentração de óleo nas bordas equivalente a 10% da concentração máxima localizada no baricentro do derrame.

O passo número 7 corresponde à definição dos cenários de derrames, contemplando a descrição do local, a duração do tempo de simulação, o número de simulações e as condições de correntes e ventos.

O passo número 8 é a própria realização das simulações com o modelo de análise de risco, sendo o passo número 9 a interpretação dos resultados.

### 3 - O MODELO MATEMÁTICO

O modelo calcula, para cada ponto da área em avaliação, a trajetória do baricentro do derrame que é transportado ao longo da área, em função das correntes e dos ventos assumidos. As correntes são função do ponto da malha e os ventos são gerados através das matrizes de transição.

Cada cenário de simulação é repetido um grande número de vezes, produzindo-se trajetórias distintas em função da utilização das matrizes de transição. As simulações continuam até o final do tempo de simulação, ou até que o baricentro do derrame atinja a costa ou saia da área em avaliação.

Os dados de entrada para cada simulação do modelo são apresentados a seguir.

- *Nome* - nome da simulação;
- *Nopera* - nome do operador;
- *Data* - data da simulação;
- *X(0)* - coordenada UTM leste do ponto de derrame (384.591);
- *Y(0)* - coordenada UTM norte do ponto do derrame (7.504.979);
- *Ivento* - controle para eleição da matriz de vento (1 = vento forte, 2 = vento médio, 3 = vento fraco);
- *Icorrente* - controle para eleição do início do ciclo de correntes (1 a 12 = hora de início do ciclo de correntes, 13 = início aleatório);
- *NDD* - tempo de duração da simulação (526 horas para 290 m<sup>3</sup> e 3350 horas para 46.000 m<sup>3</sup>);
- *NSI* - número de simulações (2000);
- *DEL* - intervalo de tempo para simulação (incremento temporal - hora);
- *IMPT* - controle para impressão do arquivo de saída *nome.TRA*.

O tempo de simulação de cada cenário é determinado em função de valores pré-estabelecidos da concentração do óleo na coluna d'água e da espessura do óleo na superfície. Para a realização deste cálculo, são necessários os dados a seguir listados:

- *ÓLEO* - nome do óleo que se está simulando em acordo com o banco de dados do modelo ADIOS;
- *VOL* - volume de óleo derramado;
- *DISP* - percentual de óleo disperso na coluna d'água (obtido com o modelo ADIOS);
- *SUPER* - percentual de óleo remanescente na superfície (obtido com o modelo ADIOS);
- *ONDA* - altura de meia onda característica da região;

- *PICO* – neste caso, o valor de pico é de 2,73, correspondente à adoção de um perfil gaussiano. Esse valor é a correlação entre a concentração no baricentro do derrame e a concentração média de derrame;
- *ROO* - densidade do óleo.

Para a execução da modelagem probabilística de derrames de petróleo, foi confeccionada uma matriz com grade de 5 km x 5 km, onde para cada nó se definem a batimetria, o nível de sensibilidade e o tipo de corrente naquele ponto. A linha de costa utilizada nessa análise é representativa do traçado real da costa, extraída da Carta Náutica da região.

Os valores de corrente típica sobre a Corrente do Brasil, para a região, foram obtidos por vários autores, através de cálculos geostroficos ou medidas diretas. A partir de cálculos geostroficos, tem-se: 65 cm/s, em 23°S (STRAMA, 1989); 70 cm/s, em 23°30'S (SIGNORINI, 1978); 55 cm/s em 24°S (SIGNORINI, 1978) e 31 cm/s, também em 24°S (EVANS *et alli*, 1983). Com medidas diretas, foram obtidos os seguintes valores: 50 cm/s, em 23°S (EVANS & SIGNORINI, 1985) e 40 cm/s, em 24°S (REID *et alli*, 1977) (*apud* Cirano, 1995). Logo, para efeito de rodada do modelo se colocou o valor máximo de 70 cm/s, considerando também a maré de enchente local, que no caso não é predominante. As estatísticas de vento foram extraídas de séries temporais da Diretoria de Hidrografia e Navegação – Banco Nacional de Dados Oceanográficos (DHN/BNDO).

Para a definição da sensibilidade de cada ponto de grade da matriz foram utilizadas, além da linha de costa, a batimetria e a corrente típica local.

Apenas a **costa** foi considerada de “**alta sensibilidade**”, devido, principalmente, em se tratar do Estado do Rio de Janeiro, com seu turismo e atividades pesqueiras intensas presentes em todo o litoral, bem como à presença de ecossistemas de alta sensibilidade ambiental, como manguezais, principalmente na Baía de Guanabara. Consideraram-se como de “**média sensibilidade**” as **áreas submarinas** localizadas entre as isóbatas de 50 e 100 m, onde ocorrem atividades pesqueiras de recursos demersais. Por sua vez, as áreas de “**baixa sensibilidade**” correspondem àquelas localizadas **em direção offshore**.

Para análise da sensibilidade e consistência do modelo de dispersão, realizou-se um grande número de simulações variando-se o incremento temporal e o número de simulações. O incremento temporal adotado foi diário, ou seja, a trajetória do baricentro é calculada a cada 24 horas. Para efeito de simulação buscou-se achar um número de iterações suficientemente grande para que não houvesse mudança significativa nas matrizes, adotando-se 2000 simulações para cada cenário.

#### 4 -RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE ANÁLISE DE RISCO

Conforme mencionado anteriormente, as hipóteses acidentais consideraram dois volumes de derrame, respectivamente, de 290 m<sup>3</sup> e 46.000 m<sup>3</sup>.

Cada um desses vazamentos foi apreciado sob condições constantes de ventos fortes, correntes iniciais de enchente de maré, sendo que os tempos de simulação previamente calculados, como resultado dos volumes vazados e características do óleo para os volumes em ordem crescente.

As saídas gráficas resultantes das simulações, apresentadas nas Figuras 4-1 e 4-2, mostram as probabilidades de toque da mancha do vazamento em cada nó da grade de sensibilidade, sob forma de áreas de igual probabilidade, para cada cenário, testado respectivamente por 526 horas para 290 m<sup>3</sup> e 3350 horas para 46.000 m<sup>3</sup>.

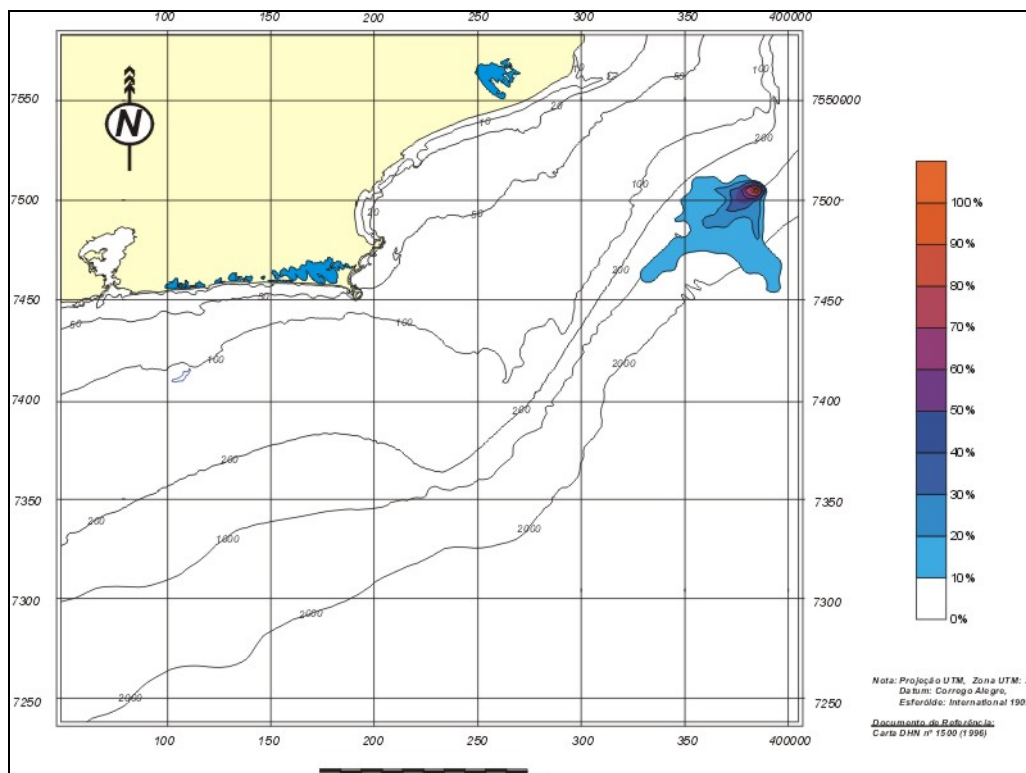


O derramamento caracterizado pela Figura 4-1, referente a um vazamento de 290 m<sup>3</sup> de óleo, alcança ao longo do eixo norte-sul magnitudes de aproximadamente 60 km; assim como no eixo leste-oeste, em que atinge uma largura máxima aproximada de 70 km.

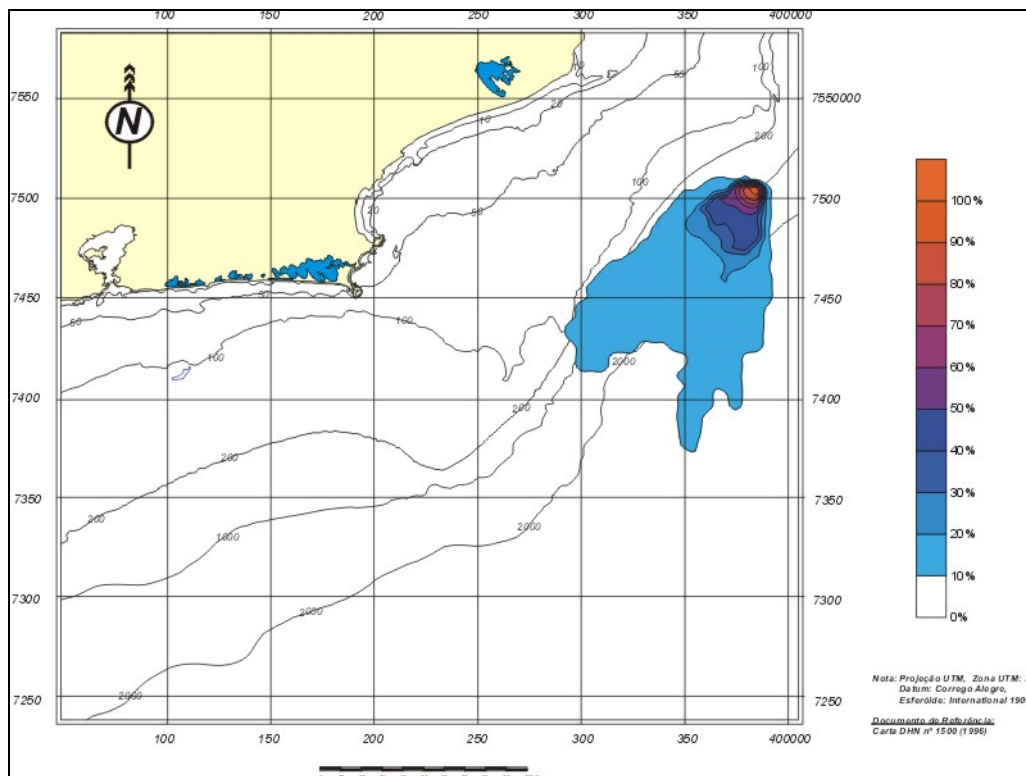
O derrame caracterizado pela Figura 4-2, referente a um vazamento de 46.000 m<sup>3</sup>, alcança no eixo norte-sul aproximadamente 145 km de distância e sua largura máxima na extremidade da área de influência foi de 100 km.

A análise dos resultados permite concluir que a região costeira, considerada de “alta sensibilidade”, **tem probabilidade nula** de ser atingida pela mancha, em qualquer um dos cenários testados.

Desta forma, mesmo que a probabilidade de ocorrência de um vazamento fosse alta, a probabilidade de existirem impactos ambientais em área de alta sensibilidade seria de 0 (zero) %. Acredita-se que a dissipação da mancha se deva fundamentalmente, às características oceano-meteorológicas da região combinado com a características do óleo produzido na região.



**Figura 4-1: Probabilidade de toque de um volume derramado de óleo 290 m<sup>3</sup>, na coordenada X=384.591 e Y=7.504.979, com condições de vento forte e maré de enchente.**



**Figura 4-2: Probabilidade de toque de um volume derramado de óleo de 46.000 m<sup>3</sup> na coordenada X=384.591 e Y=7.504.979 com condições de vento forte e maré de enchente.**