

INVESTIGANDO O DESLOCAMENTO DO DERRAMAMENTO DO ÓLEO NO MAR POR UM MODELO DE REGRESSÃO

José Alexandre R. Vieira¹ (Bolsista do PRH-25/ANP/MCT)
Francisco Antônio M. de Souza² (DME/CCT/UFCG)

¹josealex@dme.ufcg.edu.br

²Departamento de Matemática e Estatística- DME/CCT/UFCG
Avenida Aprigio Veloso, 882
Caixa Postal 10044
Campina Grande-PB
CEP: 58.109-970
fsouza@dme.ufcg.edu.br

O meio ambiente é hoje uma das principais preocupações do setor industrial e, porque não dizer, da sociedade em geral. Essa preocupação é ainda maior no caso particular da indústria petrolífera, pelo fato de ser uma atividade de alto risco e que pode trazer consequências desastrosas para o meio ambiente, no caso de derramamento de óleo. Dentre as maiores catástrofes ambientais a que estamos sujeitos estão aquelas decorrentes de grandes derramamentos de óleo, principalmente quando estes acontecem próximo a regiões costeiras. Geralmente, a maioria desses acidentes é de pequeno porte e de curta duração, porém uma fração considerável de derramamento de óleo costuma atingir grandes dimensões, causando desastres ecológicos incontroláveis. Para a realização de um combate eficiente do derrame de óleo ou seus derivados, a equipe de resposta às emergências necessita possuir o conhecimento prévio do comportamento físico-químico do óleo, das condições meteorológicas, no momento do acidente, e da dimensão do derrame, para assim, promover uma ação eficaz no combate à mancha. Portanto, o conhecimento da trajetória seguida por um eventual derramamento é de fundamental importância na hora de planejar rotas para navios tanques, pontos de carga e descarga de óleo, rotas de oleodutos, etc. Os modelos de derramamento de óleo são governados, dentre outros aspectos, pelos processos de advecção (vento e corrente marítima), dispersão horizontal (linear, turbulenta e gravitacional), inércia, viscosidade, tensão superficial, emulsificação, transferência de massa e mudanças nas propriedades físico-químicas do óleo. Alguns modelos mais sofisticados abordam, ainda, o balanço de massa devido à destilação, relacionada a elementos tóxicos, voláteis e aromáticos.

meio ambiente-1, modelagem estatística-2, regressão-3.

1. INTRODUÇÃO

O meio ambiente é hoje uma das principais preocupações do setor industrial e, porque não dizer, da sociedade em geral. No caso particular da indústria petrolífera, pelo fato de ser uma atividade de alto risco para o meio ambiente, essa preocupação é ainda maior. Uma das maiores catástrofes ambientais que podem acontecer são os grandes derramamentos de petróleo, fundamentalmente quando estes acontecem em regiões costeiras.

Os procedimentos adotados internacionalmente, com relação a incidentes com derramamento de óleo, têm como base primária os critérios adotados por países signatários do Tratado de Prevenção da Poluição Marinha Bethlem *et al.* (2002), o que recai na auto-gestão, por parte de órgãos governamentais. Em países como EUA, Noruega, Inglaterra, Austrália e Canadá, a elaboração de modelos para derramamento de óleo é administrada por centros de pesquisa das universidades e do governo.

No Brasil, diversas entidades não governamentais, e organismos como o IBAMA, exercem o papel de fiscalização sobre aspectos ambientais decorrentes de derramamento de óleo.

Assim, nosso trabalho consiste em estudar os modelos de derramamento de óleo no mar, sob o ponto de vista físico e estatístico, visto que, a utilização de tais modelos possibilitam a previsão da direção do deslocamento do óleo no mar, contribuindo na tomada de decisão para proteção ambiental.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Nas últimas décadas, a modelagem de derramamento de óleo no mar teve um rápido desenvolvimento devido ao aumento da modelagem multidisciplinar e ao recente avanço computacional.

Podemos afirmar que este assunto é essencialmente multidisciplinar, pois, para compreender todo o sistema, é necessário ter conhecimento de disciplinas que versam sobre química, física, sedimentologia, dinâmica dos fluidos, dentre outras.

2.1 Modelos físicos

Os modelos físicos constituem uma base necessária para o desenvolvimento de modelos de derramamento de óleo no mar, uma vez que as circunstâncias físicas, que incluem correntes, ondas, luz, marés, turbulência, dentre outras, determinam o transporte e a dispersão de todo o material suspenso e dissolvido no mar, incluindo contaminantes e nutrientes, e afetam, de forma direta, toda a atividade biológica, que vai desde o crescimento do fitoplâncton até o comportamento dos peixes. Consequentemente, as circunstâncias físicas são elementos necessários na modelagem de um derramamento de óleo em regiões litorâneas.

2.1.1 Processos físicos envolvidos na modelagem de derramamento de óleo no mar

São muitos os processos físicos que têm lugar na modelagem de derramamento de óleo no mar. Segundo Paladino (2000), os fenômenos mais importantes a serem considerados são:

- **Advecção:** É o processo de transporte de poluentes, dado pelo arraste das correntes marinhas e dos ventos. Também são transportadas pelas correntes subsuperficiais as pequenas frações do poluente que se desprendem da mancha por dispersão e ficam suspensas durante algum tempo na subsuperfície da água. Para a correta quantificação deste fenômeno, é importante conhecer com precisão os campos de ventos e correntes na superfície da água e, para isto, modelos atmosféricos e oceanográficos devem ser acoplados aos modelos de trajetórias.
- **Difusão Turbulenta:** A turbulência superficial, resultante do contato água/vento, faz com que a mancha se espalhe mais rapidamente. As tensões induzidas horizontalmente aumentam o espalhamento horizontal da mancha, enquanto que as tensões induzidas verticalmente causam a dispersão vertical da mancha, através do desprendimento de pequenas bolhas (fenômeno de dispersão), que logo serão afetadas por outros processos de degradação, como diluição, emulsificação, etc. Em alguns modelos, a dispersão turbulenta horizontal é considerada juntamente com o espalhamento devido à gravidade e a tensão superficial, já que, na realidade, ambos os fenômenos têm o mesmo efeito.
- **Espalhamento:** O espalhamento de uma mancha corresponde à expansão sua horizontal, devido à tendência do poluente em escoar sobre si mesmo, causada pela força da gravidade e tensão superficial. Este processo é um dos que mais afetam o comportamento da mancha, especialmente nos instantes imediatamente após a ocorrência do derramamento.
- **Evaporação:** O fenômeno de evaporação é extremamente complexo, devido ao fato do petróleo ser um fluido formado por uma grande quantidade de componentes. Estes componentes têm diferentes temperaturas de evaporação, assim como diferentes graus de solubilidade e saturação no ar, o que torna muito difícil um tratamento detalhado deste fenômeno.
- **Dispersão:** A dispersão é decorrente das tensões turbulentas, que tendem a desprender bolhas da mancha do poluente, fazendo com que sejam imediatamente afetadas por outros processos de degradação (emulsificação, diluição, biodegradação, etc).
- **Emulsificação:** É o processo de formação de emulsões de água em óleo. Este processo, embora não seja geralmente levado em conta nos modelos de trajetória, devido a sua alta complexidade, repercute fortemente na hidrodinâmica dos derrames, pelo fato de modificar, de forma considerável, as propriedades do óleo, como densidade e viscosidade. Além disso, este processo pode aumentar em até 5 vezes o volume, em relação ao volume inicial do derrame, com a conseqüente repercussão no balanço global de massa.

Além dos processos físicos citados acima, um conjunto de informações a respeito das condições do derramamento devem ser levados em consideração, tais como: dados geofísicos (ventos, correntes, temperatura, etc), posição do derramamento, tipo de óleo, taxa e duração do derramamento, dentre outros.

2.2 Modelagem dos poluentes

A modelagem dos poluentes também é de extrema importância para modelar a qualidade da água e o ecossistema, uma vez que os poluentes são substâncias que afetam a qualidade da água e, conseqüentemente, interferem de forma direta todo o meio ambiente.

O comportamento dos poluentes é muito variado. Por exemplo, o óleo pode comportar-se de diversas maneiras, dependendo do tipo e das condições ambientais. Além disso, alguns poluentes submetem-se a reações químicas, ao entrarem em contato com a água, enquanto que outros podem unir-se a sedimentos. Devido a essa grande variedade de comportamento, cada poluente deve ter seu próprio algoritmo na modelagem de seu comportamento, James (2005).

Para um poluente comportar-se como uma substância radioativa passiva, este deve ser conservativo, ter fonte local bem definida e dissipadores. Os elementos que se aproximam a estes poluentes são as substâncias radioativas com meia-vida longa.

Outros poluentes possuem um comportamento mais complexo, como é o caso dos metais, produtos químicos e tóxicos, sedimentos e derramamentos de óleo. Este último atraiu muita atenção por parte dos pesquisadores, devido aos resultados imediatos e catastróficos dos principais acidentes, James (2005).

Para se modelar um derramamento de óleo, é necessário levar em consideração várias propriedades físicas e químicas do óleo, como, por exemplo, advecção, difusão, evaporação, dispersão e emulsificação, o que torna a modelagem desse poluente ainda mais complexa.

Assim, podemos utilizar os modelos de regressão para prever valores de uma variável, expressando sua relação com outras variáveis, quantitativas e/ou qualitativas.

2.3 Regressão Linear Múltipla

Em um modelo de regressão linear múltipla, admitimos que o valor da variável dependente é função de duas ou mais variáveis independentes. O modelo estatístico de uma regressão linear múltipla com, k variáveis independentes, é

$$Y_j = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_{ij} + \varepsilon_j, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Utilizando notação matricial o modelo fica

$$y = X\beta + \varepsilon, \quad (2)$$

onde

$$y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} & \cdots & X_{k1} \\ 1 & X_{12} & X_{22} & \cdots & X_{k2} \\ 1 & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{1n} & X_{2n} & \cdots & X_{kn} \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \text{ e } \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}.$$

Segundo Hoffmann (1983), ao estabelecer o modelo de regressão linear múltipla, pressupomos que:

- I. a variável dependente (Y_j) é função linear das variáveis independentes (X_{ij} , $i = 1, \dots, k$);
- II. os valores das variáveis independentes são fixos;
- III. $E(\varepsilon_j) = 0$, ou seja, $E(\varepsilon) = \mathbf{0}$, onde $\mathbf{0}$ representa o vetor nulo de dimensão n ;
- IV. os resíduos são homocedásticos, isto é, $E(\varepsilon_j^2) = \sigma^2$;
- V. os resíduos são não-correlacionados entre si, ou seja, $E(\varepsilon_j \varepsilon_h) = 0$ para $j \neq h$;
- VI. os resíduos têm distribuição normal.

Considere $p = k + 1$, o número de parâmetros lineares a serem estimados, que formam o vetor $(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k)$. Se o número de observações for igual a p , a determinação dos parâmetros reduz-se a um problema matemático de resolução de um sistema de p equações com p incógnitas, não sendo possível fazer qualquer análise estatística. Desta forma, devemos ter $n > p$.

2.3.1 Estimação dos parâmetros pelo método dos mínimos quadrados

A estimativa do vetor de parâmetros β , pelo método dos mínimos quadrados, é dada por, Draper e Smith (1998)

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'y, \quad (3)$$

onde X' é a transposta da matriz X .

Podemos mostrar que $\hat{\beta}$ é um estimador não-tendencioso de β . Para tanto, substituindo (2) em (3) obtemos

$$\hat{\beta} = \beta + (X'X)^{-1} X'\varepsilon. \quad (4)$$

Lembrando as pressuposições II e III, verificamos que

$$E(\hat{\beta}) = \beta, \quad (5)$$

ou seja, $\hat{\beta}$ é um estimador não-tendencioso para β .

2.3.2 Análise de variância da regressão linear múltipla

Em uma regressão linear múltipla, a soma de quadrados dos resíduos, ou soma de quadrados residual, é dada por

$$SQRes = y'y - \hat{\beta}X'y, \quad (6)$$

enquanto que a soma de quadrados total é dada por

$$SQtotal = y'y - \frac{(\sum Y_j)^2}{n}. \quad (7)$$

Por sua vez, a soma de quadrados da regressão é dada por

$$SQReg = \hat{\beta}X'y - \frac{(\sum Y_j)^2}{n}. \quad (8)$$

Esses resultados nos levam à construção do seguinte quadro de análise de variância

Tabela 1. Quadro de análise de variância

Causa da variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados
Regressão	k	$\hat{\beta}X'y - \frac{(\sum Y_j)^2}{n}$
Resíduos	$n - k - 1$	$y'y - \hat{\beta}X'y$
Total	$n - 1$	$y'y - \frac{(\sum Y_j)^2}{n}$

O quadrado médio residual, dado pelo quociente $s^2 = \frac{SQRes}{n - k - 1}$, é uma estimativa não-tendenciosa da variância residual σ^2 .

Obtidas as estimativas dos desvios padrões das estimativas dos parâmetros, dadas pelas raízes quadradas dos elementos da diagonal principal da matriz $(X'X)^{-1}s^2$, podemos utilizar o valor

$$t = \frac{\hat{\beta}_i - \beta_i}{s(\hat{\beta}_i)}, \quad (9)$$

associado a $n - k - 1$ graus de liberdade, para testar hipóteses a respeito dos valores dos parâmetros. Podemos, ainda, construir intervalos de confiança para os parâmetros. Escolhido o nível de confiança, e sendo t_0 o correspondente valor de crítico de t , o intervalo de confiança para β_i é

$$\hat{\beta}_i - t_0 s(\hat{\beta}_i) < \beta_i < \hat{\beta}_i + t_0 s(\hat{\beta}_i). \quad (10)$$

Devemos ressaltar, de acordo com Hoffmann (1983), que tanto o teste t quanto o intervalo de confiança somente são válidos se os resíduos tiverem distribuição normal.

O coeficiente de determinação múltipla é definido por

$$R^2 = \frac{SQReg}{SQTotal} \quad (11)$$

e representa a proporção da variabilidade total que é explicada pelo modelo de regressão linear múltipla. O coeficiente de determinação corrigido para m graus de liberdade, denotado por $\bar{R}^2$ é dado por

$$\bar{R}^2 = \frac{(n - 1)R^2 - k}{n - k - 1}. \quad (12)$$

2.3.3 Uso das variáveis centradas

Para simplificar os cálculos, muitas vezes trabalhamos com as variáveis centradas

$$x_{ij} = X_{ij} - \bar{X}_i, \text{ com } i = 1, 2, \dots, k \text{ e } j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

onde

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{ij}. \quad (14)$$

Desta forma, o modelo estatístico fica

$$Y_j = \beta_0 + \beta_1 x_{1j} + \beta_2 x_{2j} + \dots + \beta_k x_{kj} + \varepsilon_j, \text{ com } j = 1, 2, \dots, n, \quad (15)$$

ou, em notação matricial,

$$Y = X\beta + \varepsilon, \quad (16)$$

com as devidas mudanças nas entradas da matriz X .

2.3.4 Aplicação de uma regressão múltipla com duas variáveis independentes

A Tabela 2, a seguir, mostra os valores de uma amostra de 6 observações das variáveis:

- Y_j : Deslocamento da mancha de óleo (*km*) em relação ao local do derramamento;
- X_{1j} : Temperatura da água ($^{\circ}C$) no local do derramamento;
- X_{2j} : Velocidade do vento (*km/h*) no local do derramamento;

Tabela 2. Dados referentes a um derramamento de óleo

Deslocamento da mancha (<i>km</i>)	Temperatura da água ($^{\circ}C$)	Velocidade do vento (<i>km/h</i>)
1,5	0	0
6,5	1	2
10,0	1	4
11,0	2	2
11,5	2	4
16,5	3	6

Fonte: Hoffmann, 1983.

Com base nos dados acima, obtemos:

$$\begin{aligned} \sum Y_j &= 57 & \sum X_{1j} &= 9 & \sum X_{2j} &= 18 \\ \bar{Y} &= 9,5 & \bar{X}_1 &= 1,5 & \bar{X}_2 &= 3 \\ \sum Y_j^2 &= 128,5 & \sum x_{1j}^2 &= 5,5 & \sum x_{2j}^2 &= 22 \\ \sum x_{1j} Y_j &= 25,5 & \sum x_{2j} Y_j &= 49 & \sum x_{1j} x_{2j} &= 9. \end{aligned} \quad (17)$$

Tendo em vista o modelo

$$Y_j = \beta_0 + \beta_1 x_{1j} + \beta_2 x_{2j} + \varepsilon_j, \quad (18)$$

construímos as matrizes

$$X'X = \begin{bmatrix} n & 0 & 0 \\ 0 & \sum x_{1j}^2 & \sum x_{1j} x_{2j} \\ 0 & \sum x_{1j} x_{2j} & \sum x_{2j}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6 & 0 & 0 \\ 0 & 5,5 & 9 \\ 0 & 9 & 22 \end{bmatrix} \text{ e } X'Y = \begin{bmatrix} \sum Y_j \\ \sum x_{1j} Y_j \\ \sum x_{2j} Y_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 57 \\ 25,5 \\ 49 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

A seguir, determinamos as estimativas dos parâmetros

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'Y = \begin{bmatrix} 1/6 & 0 & 0 \\ 0 & 11/20 & -9/40 \\ 0 & -9/40 & 11/80 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 57 \\ 25,5 \\ 49 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

A equação estimada é, então

$$\hat{Y}_j = 9,5 + 3x_{1j} + 2x_{2j}. \quad (21)$$

Substituindo $x_{1j} = X_{1j} - \bar{X}_1 = X_{1j} - 1,5$ e $x_{2j} = X_{2j} - \bar{X}_2 = X_{2j} - 3$, na equação (21), obtemos

$$\hat{Y} = 2 + 3X_{1j} + X_{2j}.$$

Podemos calcular a soma de quadrados da regressão e dos resíduos, assim

$$\begin{aligned} SQReg &= \hat{\beta}_1 \sum x_{1j} Y_j + \hat{\beta}_2 \sum x_{2j} Y_j \\ &= 3 \times 25,5 + 1 \times 49 = 125,5 \end{aligned} \quad (22)$$

e

$$SQRes = \sum Y_j^2 - 125,5 = 128,5 - 125,5 = 3. \quad (23)$$

Com esses resultados podemos construir a seguinte tabela de análise de variância.

Tabela 3. Quadro de análise de variância

Causa da variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F
Regressão	2	125,5	62,75	62,75
Resíduos	3	3	1	-
Total	5	128,5	-	-

Para 2 e 3 graus de liberdade e ao nível de significância de 1%, o valor crítico de F é 30,82. Portanto, o resultado é significativo, isto é, rejeita-se, a esse nível de significância, a hipótese $H_0 : \beta_1 = \beta_2 = 0$.

O coeficiente de determinação múltipla é

$$R^2 = \frac{125,5}{128,5} = 0,977,$$

ou seja, 97,7% da variação total referente ao deslocamento da mancha de óleo é explicada pelo modelo ajustado.

Até aqui, analisamos o caso de uma regressão linear múltipla com duas variáveis independentes. Entretanto, a metodologia pode ser generalizada para o caso de uma regressão linear múltipla com k variáveis independentes.

5. CONCLUSÃO

De acordo com James (2005), nas últimas décadas, a modelagem de derramamento de óleo no mar atraiu muita atenção por parte dos pesquisadores, devido aos resultados imediatos e catastróficos dos principais acidentes.

Desta feita, um bom modelo de derramamento de óleo no mar é imprescindível para combater eficientemente um derrame de óleo ou derivados, visto que os impactos que este tipo de acidente pode causar são os mais diversos, abrangendo desde danos econômicos, por problemas causados na indústria pesqueira, até a inutilização de regiões turísticas.

Entretanto, vários fatores, dentre eles a dificuldade na obtenção de dados relativos a desastres ambientais causados pela indústria do petróleo, têm limitado o progresso da modelagem de derramamento de óleo no mar, no que se refere à validação dos modelos.

6. AGRADECIMENTOS

Ao PRH-25/ANP, pela bolsa de Iniciação Científica e ao Instituto Milênio / IM-AGIMB/CNPq, pelos recursos computacionais do Laboratório de Informática da Unidade Acadêmica de Matemática e Estatística – LIDME, do DME/CCT/UFCG.

7. REFERÊNCIAS

- BETHLEM, C. B. P. e outros. Modelagem de Derramamento de Óleo no Mar. **Informação Técnica ELPN/IBAMA**, N° 023/02, 2002.
- DRAPER, N. R., SMITH, H. **Applied Regression Analysis**. 3ª edition. New York: John Wiley and Sons, 1998. 736 p.
- HOFFMANN, R.; VIEIRA, S. **ANÁLISE DE REGRESSÃO: Uma Introdução à Econometria**. 2ª edição. São Paulo: Editora Hucitec, 1983. p.109-201.
- JAMES, I. D. Modelling pollution dispersion, the ecosystem and water quality in coastal waters: a review. **Environmental Modelling & Software**, v.17, p.363-385, 2005.
- PALADINO, E. E. **Modelagem Matemática e Simulação Numérica de Trajetórias de Derrames de Petróleo no Mar**. Abr. 2000. 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.
- STOGNES, K., JOHANSEN, O. **Statmap: a 3-dimensional model for oil spill risk assessment**. *Environmental Modelling & Software*, Vol 19, pp. 727-737, 2004.

A SEA OIL SPILLING EVALUATION BY A REGRESSION MODEL

In the last years, the environment problems are treated as a principal priority, particularly in petroleum industry, an activity having a high risk and that it can bring disastrous consequences for the environment, caused by oil spilling. To perform an efficient combat of the oil spilling, the emergency team needs to possess a previous knowledge of the oil proprieties, of the oceanographical conditions at the exact accident and the dimension of the spill. So, the knowledge of the trajectory followed for a oil spilling is very important in planning routes for petroleum ships, points and discharge of oil, routes of pipe-lines, and so on. The models of oil spilling are particularly governed by advection processes, horizontal dispersion, inertia, viscosity, superficial tension, transference of mass and changes in the oil physicist-chemistries properties. Some sophisticated models use characteristics as the rocking mass due to destillation, among others. A regression model consists of supplying an instrument capable to predict values of a variables using its relation with other quantitative and/or qualitative variables. The regression models constitute a class of statistical methods used in several applications in different areas, particularly in the petroleum industry. In this work we discuss the regression modelling oil spilling data in the sea.

environment-1, statistical models-2, regression-3.