

ABORDAGEM ANALÍTICA APLICADA A UM PROBLEMA DE DISPERSÃO DE POLUENTES EM CORPOS HÍDRICOS

BETTINA RODRIGUES MACHADO¹; TIRZAH MOREIRA SIQUEIRA²;
GUILHERME JAHNCKE WEYMAR²; RENATA KLEIN MORAES²; DANIELA
BUSKE³

¹ Universidade Federal de Pelotas – be_rmachado@hotmail.com

² Universidade Federal de Pelotas – tirzahmelo@hotmail.com

² Universidade Federal de Pelotas – guilhermejahncke@gmail.com

² Universidade Federal de Pelotas – srtklein@gmail.com

³ Universidade Federal de Pelotas – danielabuske@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A contaminação ambiental por substâncias químicas em decorrência das atividades antrópicas teve início há várias décadas. No entanto, somente a partir da década de 1970, com o aprimoramento da legislação ambiental em âmbito mundial, os estudos envolvendo as consequências das contaminações sobre o meio ambiente e a saúde humana ganharam relevância (YOSHINARY, 2015).

Os processos que governam o transporte e a difusão de poluentes são numerosos e de alta complexidade, não seria possível descrevê-los sem a utilização de modelos matemáticos, que são instrumentos técnicos indispensáveis para a gestão ambiental e segurança das pessoas (RAMOS et al., 2014). Um modelo matemático de dispersão é uma expressão matemática que representa o efeito da água sobre os poluentes. De acordo com os problemas ocasionados pela poluição das águas torna-se necessário estudar e compreender o processo de dispersão desses poluentes para prever as possíveis consequências de impacto da poluição sobre os diversos ecossistemas (NEVES, 2012).

O presente estudo tem como objetivo apresentar a solução para um modelo de dispersão de poluentes em rios no plano bidimensional e aplicar dados experimentais a fim de avaliar o seu desempenho.

2. METODOLOGIA

Aplicando as hipóteses fundamentais, descritas em BARROS (2004), na equação de advecção-difusão obtém-se a equação bidimensional, que modela a dispersão de poluentes em um corpo hídrico no plano longitudinal e vertical em regime transiente:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = \varepsilon_z \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial z^2} \quad (1)$$

onde: \bar{c} é a concentração do poluente [M.L⁻³]; ε_z é o coeficiente de dispersão transversal [L².T⁻¹]; x e z são as coordenadas do ponto de exposição [L]; \bar{u} é o perfil de velocidade do fluxo [L.T⁻¹]; t é o tempo [T].

A equação (1) está sujeita às condições de contorno de fluxo nulo no leito e na superfície do corpo hídrico, concentração inicial nula e para representar a fonte da emissão no problema considerou-se uma fonte pontual na posição Z_s descrita por um delta de Dirac.

A equação (1) é solucionada através do método de separação de variáveis (ÖSIZIK, 1993) e de uma transformação de similaridade (HANSEN, 1964).

A solução final é dada pela equação (2):

$$\bar{c}(x, z, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi \varepsilon_z t}} e^{-\left(\frac{z^2}{4\varepsilon_z t}\right)} e^{-\lambda t} e^{\frac{\lambda}{u} x} \quad (2)$$

Após o desenvolvimento da solução analítica aplica-se o modelo a um experimento da literatura para comparar os resultados gerados com os dados experimentais, os resultados numéricos foram obtidos utilizando a linguagem de programação FORTRAN 90.

3. PARAMETRIZAÇÕES E RESULTADOS

3.1 Parametrizações

Em problemas de dispersão de poluentes, as escolhas das parametrizações turbulentas representam um aspecto importante na modelagem. Pois esses parâmetros contêm todas as informações da física do problema. Assim, apresentam-se as parametrizações escolhidas para o perfil de velocidade e para o coeficiente de difusão turbulenta, já adimensionalizadas. O perfil de velocidade turbulenta utilizado segue aproximadamente o perfil da lei logarítmica dado por FISCHER et al. (1979) e:

$$U(Z) = 1 + \frac{u^*}{\bar{u} \kappa} [1 + \ln(Z)] \quad (3)$$

sendo:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (4)$$

onde u^* é a velocidade de atrito (m.s^{-1}), \bar{u} é a velocidade média do escoamento (m.s^{-1}), κ é a constante de Von Kármán, τ_0 é a tensão de cisalhamento no fundo do rio ($\text{Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) e ρ a densidade do fluido (Kg.m^{-3}). O coeficiente de difusão vertical, já adimensionalizado, utilizado na simulação das duas abordagens pode ser derivado a partir do perfil de velocidade, dado por FISCHER et al. (1979):

$$\varepsilon_z(Z) = \frac{u^*}{\bar{u} \kappa} Z(1 - Z) \quad (5)$$

em que \bar{u} é a velocidade média do escoamento (m.s^{-1}), κ é a constante de Von Kármán e u^* é a velocidade de atrito (m.s^{-1}).

3.2 Resultados

O experimento utilizado para aplicar o modelo está descrito em NOKES & MCNULTY (1984). Os autores simularam a dispersão de uma solução contendo NaCl em um canal com 15 m de comprimento e profundidade de 0,15 m. O canal possui largura de 0,56 m, velocidade média de $0,55 \text{ m.s}^{-1}$, a constante de Von Kármán, κ , é de 0,35 e a velocidade de atrito, u^* é de $0,055 \text{ m.s}^{-1}$.

Os gráficos apresentados na Figura 1 mostram a concentração em função da profundidade, para distância de $X=0,5$, para três instantes de tempo ($t=0,1\text{s}$; $t=1\text{s}$ e $t=100\text{s}$) e em diferentes alturas de fonte ($Z_s=0,2$, $Z_s=0,5$, $Z_s=0,75$ e $Z_s=1,0$).

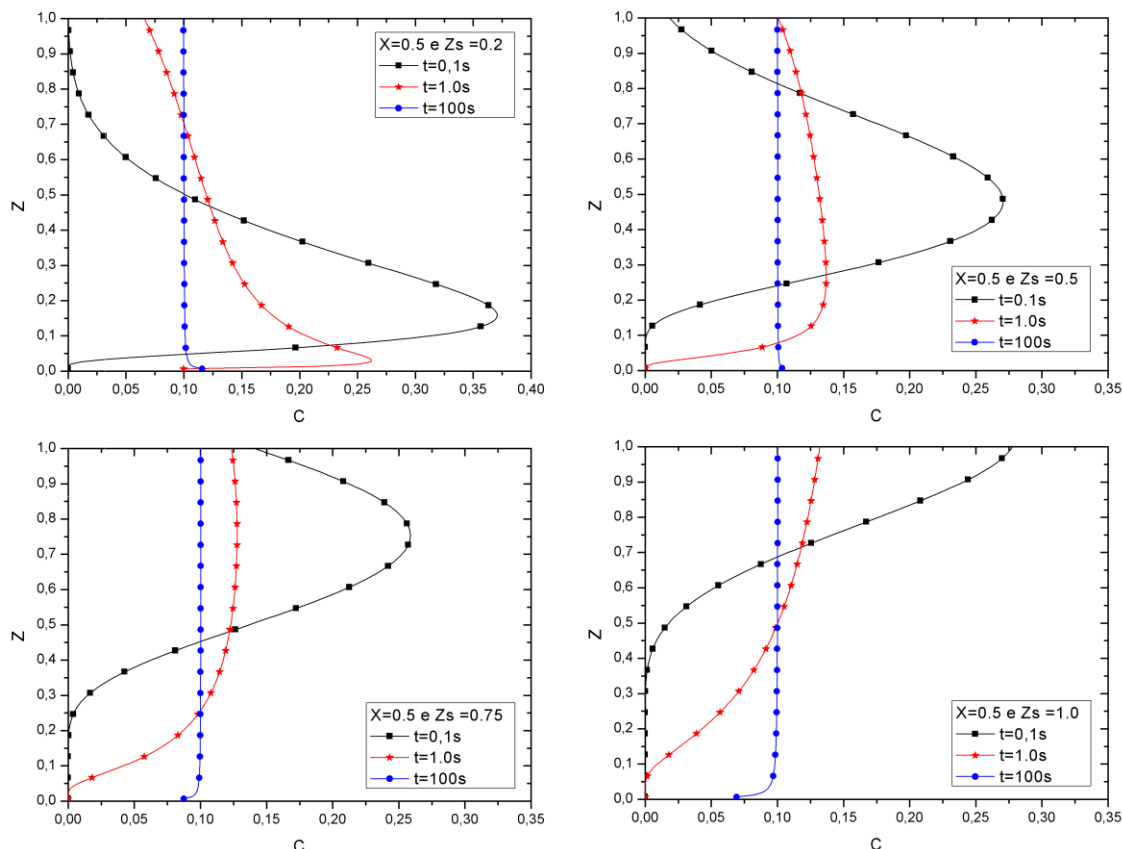


Figura 1- Evolução no tempo da concentração de poluentes C em função da profundidade, a uma distância de $X=0,5$ da fonte, para quatro posições de fonte ($Z_s=0,2$, $Z_s=0,5$, $Z_s=0,75$ e $Z_s=1,0$).

Analisando os gráficos, observa-se que para os instantes iniciais ($t=0,1s$) a concentração alcança o seu valor máximo nas alturas em que as fontes poluidoras estão localizadas, esses gráficos mostram que o modelo está conseguindo representar o problema nos instantes iniciais. Nota-se que para o tempo $t=100s$ não há oscilações na concentração, o que indica uma tendência de homogeneização do poluente.

Para avaliar o desempenho do modelo uma análise estatística (HANNA, 1989) foi realizada. Os índices estatísticos considerados foram: o erro quadrático médio normalizado (NMSE), coeficiente de correlação (COR), fração de inclinação (FB) e o desvio fracional padrão (FS). Os resultados estão dispostos na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1- Avaliação estatística do modelo bidimensional utilizando o experimento de (NOKES & MCNULTY, 1984).

NMSE	COR	FB	FS
0,01	0,797	0,03	0,539

Com base na Tabela 1, observa-se os índices NMSE e FB bem próximos do valor ideal (zero) e, também um COR próximo ao ideal, o que demonstra uma boa correlação entre os dados observados e preditos. Porém, o modelo apresenta um FS distante do valor ideal, mostrando que os desvios-padrão dos dados

observados e preditos apresentam discrepâncias. Esta diferença, pode se dar pelo fato de que esta abordagem considera as parametrizações constantes. Pelos valores encontrados no NMSE, COR e FB pode-se afirmar que o modelo simula satisfatoriamente as concentrações observadas.

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi apresentada uma solução analítica para um modelo bidimensional vertical em regime transiente, simulando o processo de dispersão de contaminantes em corpos hídricos. Pelos resultados apresentados nos gráficos, pode-se concluir que o modelo utilizado consegue reproduzir adequadamente a evolução temporal do campo de concentrações em um corpo hídrico.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARROS, F. P. J. **Modelos Multidimensionais para Dispersão de Contaminantes em Rios e Canais: Soluções Híbridas por Transformação Integral**. 2004. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- FISCHER, H. B. The mechanics of dispersion in natural streams. **Journal Hydraulics Division Proceedings**. v. 93, n. 6, p.187-216, 1967.
- HANNA, S. R. Confidence limit for air quality models as estimated by bootstrap and jackknife resampling methods. **Atmospheric Environment**, v. 23, p. 1385-1395, 1989.
- HANSEN, A. G. **Similarity analysis of boundary value problems in engineering**. Canada: Prentice-Hall, 1964.
- NEVES, C. S. **Um problema de dispersão de poluentes em rios e canais por meio do método de separação de variáveis**. 2012. 74 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional), Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional (PPGMC), Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, 2012.
- NOKES, R.; MCNULTY, A.; WOOD, I. Turbulent dispersion from a steady two-dimensional horizontal source. **Journal of Fluid Mechanics**, v.149, p.147–159, 1984.
- ÖZISIK, M. N. **Heat Conduction**. John Wiley and Sons. 1993.
- RAMOS, P. A.; FREIRE, C. D.; VILLAR, L. B. B. S.; CHAVES, L. V. C.; ALVES, N. J. J.; TAVATES Neto H. I. J. O Uso da modelagem para predizer a dispersão de nuvens poluentes na atmosfera. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 9006-9012, 2015.
- YOSHINARI, A. **Estudo comparativo entre o modelo analítico de Domenico (1987) e Wexler (1992) e suas implicações no gerenciamento de passivos ambientais**. 2015. 59 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, Rio Claro, 2015.