

MODELO METEREOLÓGICO PARA DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS EM CONDIÇÕES DE VENTO FRACO E COM VELOCIDADES ESTOCÁSTICAS

CAMILA FÁVERO¹; DANIELA BUSKE²; GLÊNIO AGUIAR GONÇALVES³

¹*Universidade Federal de Pelotas – camilafavero@msn.com*

²*Universidade Federal de Pelotas – danielabuske@gmail.com*

³*Universidade Federal de Pelotas – gleniogoncalves@yahoo.com.br*

1. INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica é a causa de diversos problemas, cuja gravidade reforça a necessidade de estudar e compreender o processo de dispersão de substâncias na atmosfera. O monitoramento e mensuração da concentração de espécies químicas nem sempre é fácil de ser obtido. Consequentemente, modelos matemáticos são usados na maioria desses estudos.

Na estimativa do campo de concentração de poluentes na baixa atmosfera, emprega-se, normalmente, a equação de advecção-difusão, sendo que os modelos Eulerianos de dispersão têm como característica a solução desta equação (PASQUILL e SMITH, 1983). Esses modelos são conhecidos por fornecerem resultados razoáveis para a maioria das condições metereológicas, exceto para condições de vento fraco ($v < 2 \text{ m/s}$).

Dentro desse contexto, o objetivo dese trabalho é obter uma solução analítica da equação de advecção-difusão utilizando a técnica de separação de variáveis juntamente com a técnica GILTT (*Generalized Integral Laplace Transform Technique*), bem como utilizar o modelo proposto na investigação da dispersão de poluentes em condições de vento fraco.

2. METODOLOGIA

O modelo matemático utilizado nesse trabalho é um modelo Euleriano que tem como base a solução da equação de advecção-difusão, descrita como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right). \quad (1)$$

O problema (1) está sujeito as condições de contorno de fluxo nulo no solo ($z=0$) e no topo da camada limite ($z=h$), inicial ($uC(0, x, y, z) = Q(0)\delta(x)F(y)\delta(z - H_s)$), e de fonte ($uC(t, 0, y, z) = Q(t)F(y)\delta(z - H_s)$).

O problema proposto é resolvido utilizando o método de separação de variáveis juntamente com a técnica GILTT, e a sua solução geral é dada por:

$$C(t, x, y, z) = F(vt - y)Q\left(t - \frac{x}{u}\right)\xi(x, z). \quad (2)$$

A função $\xi(x, z)$, na equação 2, vem da solução do termo difusivo da equação anterior pelo método GILTT (MOREIRA et al., 2009). Considerando as funções F e Q como deltas de Dirac, a solução pode ser escrita para formas distintas dependentes do tempo, ou seja:

$$C(t, x, y, z) = \frac{2}{\sqrt{16\pi^2 k_y K_x(x/u)^2}} \int_{t_0}^t u Q(\tau) e^{-\frac{(u(t-\tau)-x)^2}{4K_x(x/u)}} e^{-\frac{(v(t-\tau)-y)^2}{4k_y(x/u)}} d\tau. \quad (3)$$

Esta solução representa a concentração quando a fonte de emissão é contínua no intervalo (t_0, t) . Se essa fonte for uma fonte do tipo Heaviside, Q passa a ser constante nesse intervalo. Detalhes da derivação se encontram em GONÇALVES et al. (2018).

Sabendo que as condições metereológicas variam de forma significativa em um determinado período, pode-se utilizar a equação anterior considerando intervalos de tempo, na integração, com comprimento (duração) desejado. Dessa forma, a pluma será composta por um conjunto de segmentos C_j , para cada intervalo de tempo:

$$C(t, x, y, z) = \frac{2Qu}{\pi D} \int_{t_0}^t e^{-\frac{(A\tau^2+B\tau+C)}{D}} d\tau \xi(x, y) = \frac{2Qu}{\pi} \sum_{j=1}^N \frac{1}{D} \int_{t_{j-1}}^{t_j} e^{-\frac{(A\tau^2+B\tau+C)}{D}} d\tau \xi(x, y), \quad (4)$$

onde $A_j = u_j^2 + v_j^2$, $B_j = 2u_j(x - u_j t) + 2v_j(y - v_j t)$, $C_j = (x - u_j t)^2 + (y - v_j t)^2$ e $D_j = 4\pi K_{xj} K_{yj}(x/u)$. A solução geral para esse modelo, onde estão presentes os coeficiente difusivos nas direções horizontais é:

$$C(t, x, y, z) = \sum_{j=1}^N \frac{Q_j u_j}{\sqrt{\pi D_j A_j}} e^{-\frac{4C_j A_j + B_j^2}{4D_j A_j}} \left\{ \left[\operatorname{erf} \left(\frac{2A_j t_j + B_j}{2\sqrt{D_j A_j}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{2A_j t_{j-1} + B_j}{2\sqrt{D_j A_j}} \right) \right] \right\} \xi(x, y). \quad (5)$$

O vento médio e os coeficientes difusivos nas direções x , y e z são variáveis desconhecidas que representam aproximações de fenômenos da natureza e são obtidas através de parametrizações. Para esse modelo, foi utilizado o perfil de vento proposto por BUSINGER et al. (1971). Os coeficientes difusivos nas direções x e y foram estimados a partir das parametrizações propostas por SHARAN e SINGH (1996) e o coeficiente difusivo na direção z através do trabalho de SHARAN et al. (2002).

As velocidades estocásticas para o vento nas direções horizontais foram inseridas no programa através da relação proposta por OETTL, ALAMBAUER e STURM (2001), na qual:

$$u'(t + \Delta_{t_h}) = \rho_u u'(t) + \sigma_u (1 - \rho_u^2)^{1/2} \chi, \quad (6a)$$

$$v'(t + \Delta_{t_h}) = \rho_v v'(t) + \sigma_v (1 - \rho_v^2)^{1/2} \chi \quad (6b)$$

onde u' e v' são as flutuação da velocidade, σ_u e σ_v são o desvio padrão das respectivas velocidades em relação a direção principal do vento, χ é um número randômico com média zero e desvio padrão igual a um, ρ_u é um parâmetro de intercorrelação e Δ_{t_h} é um intervalo de tempo randômico no qual as flutuações da velocidade horizontal permanecem constantes.

O modelo simulou a dispersão de poluentes para o conjunto de dados do experimento de INEL (*Idaho National Engineering Laboratory*) (SAGENDORF e DICKSON, 1974) que apresentaram vento médio menor que 1 m/s, em condições estáveis. Os resultados obtidos foram comparados com os observados experimentalmente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A performance do modelo, considerando as parametrizações da turbulência propostas e os dados do experimento de INEL, estão apresentados na Tabela 1. Adicionalmente, é apresentada uma comparação com o modelo AERMOD (HANNA et al. 2014) e com um modelo proposto por OETTL, ALAMBAUER e STURM (2000).

Embora não esteja feita ainda uma comparação sofisticada usando dados estatísticos, o fator de 2 (fração de dados que estão entre $0,5 \leq C_p/C_o \leq 2$), comumente utilizado na validação de modelos de dispersão, é de 78%, conforme pode ser observado na Figura 1, onde os dados que encontram-se entre as duas linhas tracejadas estão dentro do fator de 2.

Tabela 1: Concentrações observadas (C_o) e preditas (C_p) pelo modelo proposto e pelos modelos AERMOD e OETTL et al. (2001).

Teste	Dist. (m)	C_o	C_p	AERMOD	Oettl et al. (2001)
4	100	153,4	112,4	141,3	169,0
	200	79,0	56,2	64,8	59,0
	400	38,8	27,5	25,6	21,0
5	100	49,6	37,8	150,9	59,0
	200	31,7	18,5	101,6	43,0
	400	11,1	9,3	48,5	18,0
7	100	46,5	35,5	158,3	46,0
	200	26,1	17,7	117,8	43,0
	400	37,1	8,9	60,6	15,0
8	100	25,7	66,7	132,1	28,0
	200	13,8	32,8	108,1	23,0
	400	14,4	16,1	59,3	9,0
9	100	43,6	59,3	87,3	77,0
	200	22,7	30,0	64,9	58,0
	400	15,7	14,6	33,3	18,0
12	100	59,3	51,8	156,6	60,0
	200	52,6	26,3	112,5	40,0
	400	29,5	13,0	57,7	17,0

Desenvolvido pela EPA (*United States Environmental Protection Agency*), para utilização em condições de vento fraco, o modelo AERMOD é um modelo de pluma estacionária com base na turbulência da camada limite planetária e em conceitos de escala (HANNA E CHOWDHURY, 2014). O modelo foi escolhido para comparação por ser o modelo recomendado para uso regulatório pela EPA. O segundo modelo (OETTL, ALAMBAUER e STURM, 2001) é um modelo Lagrangeano desenvolvido para condições de vento fraco no qual foram utilizadas parametrizações similares às utilizadas nessa pesquisa.

4. CONCLUSÕES

O modelo proposto é um modelo analítico, no sentido de que nenhuma aproximação é feita ao longo da derivação exceto pelo erro de truncamento. Assim sendo, a concentração pode ser obtida a qualquer tempo, demandando pequeno esforço computacional. A comparação preliminar com os demais modelos e com os dados experimentais mostra sua consistência. O caráter analítico do modelo o torna simples se comparado a diversos já existentes, representando vantagens no seu desenvolvimento e implementação, assim como no custo computacional para a execução.

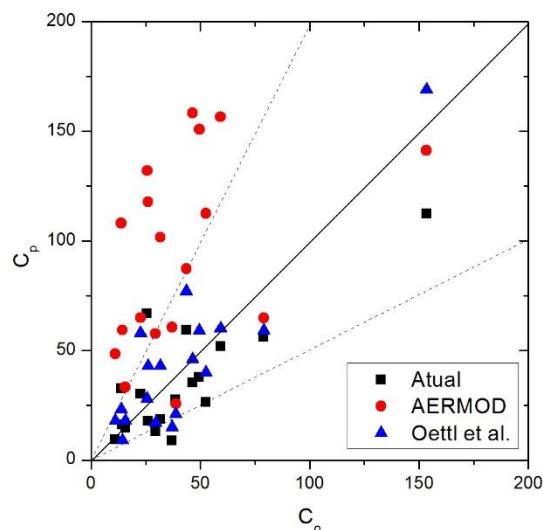


Figura 1: Gráfico de espalhamento comparando os modelos apresentados.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUSINGER, J. A.; WYNGAARD, J.C.; IZUMI Y.; BRADLEY, E. F. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.*, 28, 181–189, 1971.

GONÇALVES, G.A., BUSKE, D., QUADROS, R.S., WEYMAR, G.J. A new approach to solve the time-dependent three-dimensional advection-diffusion equation applied to model air pollution dispersion in the planetary boundary layer, *Int. J. Dev. Res.* 8(5), 20535-20543, 2018.

HANNA S. T.; CHOWDHURY B. Minimum turbulence assumptions and u^* and L estimation for dispersion models during low-wind stable conditions. *J. Air & Waste Manag. Assoc.*, 64(3), 309–321, 2014.

MOREIRA, D.M.; VILHENA, M. T.; BUSKE, D.; TIRABASSI, T. The state-of-art of the GILTT method to simulate pollutant dispersion in the atmosphere. *Atmos. Res.*, 92, 1–17, 2009.

OETTL, D.; ALMBAUER, R. A.; STURM, P. J. A new method to estimate diffusion in stable, low wind conditions. *Am. Met. Soc.*, 40 259-268, 2001.

PASQUILL, F.; SMITH, F. B. *Atmospheric Diffusion*, 3^a ed., Halsted Press, New York, 1983.

SAGENDORF, J. F.; DICKSON C. R. **Diffusion under low windspeed, inversion conditions**. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-52, 1974.

SHARAN, M.; YADAV, A. K. Plume dispersion simulation in low-wind conditions using coupled plume segment and Gaussian puff approaches. *Am. Met. Soc.*, 1625-1631, 1996.

SHARAN, M.; YADAV, A. K.; MODANI, M. Simulation of short-range diffusion experiment in low wind convective conditions. *Atmos. Env.*, 36, 1901–1906, 2002.