

## SIMULAÇÃO DA DISPERSÃO DE POLUENTES DURANTE O PERÍODO DE TRANSIÇÃO DIA-NOITE UTILIZANDO UM MODELO ANALÍTICO EULERIANO

JÉSSICA KANOPP DOS REIS<sup>1</sup>; JONAS COSTA CARVALHO<sup>2</sup>; DANIELA BUSKE<sup>3</sup>; RÉGIS SPEROTTO DE QUADROS<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas, PPGMMAT – jessicareis15@hotmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas, IMET – jonas.carvalho@ufpel.edu.br

<sup>3</sup>Universidade Federal de Pelotas, IFM – daniela.buske@ufpel.edu.br

<sup>4</sup>Universidade Federal de Pelotas, IFM – regis.quadros@ufpel.edu.br

### 1. INTRODUÇÃO

Aproximadamente 1 hora antes do pôr-do-sol, o fluxo de calor na superfície diminui progressivamente e, então, torna-se negativo durante a noite e, consequentemente, uma camada limite estável (CLE) desenvolve-se junto à superfície. Acima da CLE, na camada residual (CR), os turbilhões convectivos começam a perder intensidade e capacidade de mistura e, assim, a camada limite convectiva (CLC) começa a decair. A dispersão de poluentes por escoamentos turbulentos é de importância central em um número de problemas ambientais. Porém, menos atenção tem sido dada à dispersão na CR, onde a difusão de poluentes ocorre em condições de decaimento da turbulência convectiva. O decaimento da energia dos grandes turbilhões na CLC é o mecanismo físico que pode sustentar o processo de dispersão na CR.

Neste trabalho é investigado o processo de dispersão turbulenta ocorrendo durante o período do pôr-do-sol, focando os padrões característicos da dispersão turbulenta de poluentes liberados de uma fonte pontual contínua em uma CLP caracterizada pelo decaimento convectivo. Esta análise considera uma solução analítica da equação advecção-difusão, na qual os efeitos turbulentos são representados por coeficientes de difusão para a CLE, proposto por Degrazia et al. (2000), e para o decaimento da turbulência na CLC, proposto por Goulart et al. (2007).

É fornecida uma solução de forma fechada, que pode ser adaptado para aplicações em métodos numéricos para reproduzir a solução dentro de uma precisão prescrita. Como consequência, a análise de erro é reduzida para modelar as validações, somente, em comparação com abordagens numéricas, onde, em geral, não é separado erros de modelo a partir de outros numéricos.

### 2. PARAMETRIZAÇÃO DA TURBULÊNCIA

O objetivo desta seção é expor e discutir os coeficientes de difusão que são empregados no modelo analítico para simular o campo de concentração dos contaminantes em uma fonte pontual contínua durante o tempo de transição do sol. Assim, é necessário parametrizar o transporte turbulento na CLP dominada por cisalhamento e a dispersão turbulenta do decaimento convectivo elevado.

A seguinte relação para a difusividade turbulenta longitudinal, lateral e vertical,  $K_i (i = u, v, w)$  derivada por Degrazia et al. (2000), representa a difusão turbulenta em uma CLP dominada por cisalhamento:

$$K_i = C_i \frac{(1 - z/h)^{3/4} u_*}{1 + 3.7 \left( \frac{z}{L(z - z/h)^{5/4}} \right)} \quad (1)$$

onde  $C_x = 4.94$ ,  $C_y = 1.04$  e  $C_z = 0.41$ ,  $L$  é o comprimento de Monin-Obukhov,  $u_*$  é a velocidade de fricção da camada de superfície e  $h$  é a altura da camada estável.

Recentemente, um método geral para derivar difusividades turbulentas em ambiente de turbulência convectiva em decaimento foi proposto por Goulart et al. (2007). O método é baseado no espectro de energia 3D e na Teoria de Difusão Estatística de Taylor. A seguinte relação algébrica representa um ajuste para as difusividades convectivas em decaimento:

$$\frac{K_x}{w_* z_i} = \frac{0.069}{\sqrt{1+t_*^{1.44}}}; \quad \frac{K_y}{w_* z_i} = \frac{0.079}{\sqrt{1+t_*^{1.44}}}; \quad \frac{K_z}{w_* z_i} = \frac{0.079}{\sqrt{1+2t_*^{1.7}}} \quad (2)$$

onde  $z_i$  é a altura da camada de mistura e  $t_* = tw_*/z_i$ .

### 3. MODELO EULERIANO

A equação de advecção-difusão da poluição do ar é uma representação da conservação de massa na atmosfera. Assumindo um fechamento Fickiano da turbulência, pode-se escrever a equação bidimensional transiente da seguinte forma:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \left( \mathbf{K}_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) \quad (3)$$

onde  $\bar{c}$  indica a concentração média de um contaminante passivo (em unidades de  $\text{gm}^3$ ),  $u$  representa o vento médio (em unidades de  $\text{m/s}$ ) e  $K_z$  (em unidades  $\text{m}^2/\text{s}$ ) é a difusividade turbulenta na direção  $z$ . Na primeira ordem de fechamento, toda a informação sobre a complexidade turbulenta está contida na difusividade turbulenta.

A equação (3) está sujeita as condições de contorno de fluxo nulo no solo e no topo da CLP. É considerado que a atmosfera está limpa no tempo inicial  $\bar{c}(x, y, z, 0) = 0$ . A condição de fonte é representada por  $\bar{uc}(0, y, z, t) = Q\delta(y - y_o)\delta(z - H_s)$ , onde  $Q$  é a taxa de emissão (em unidades de  $\text{g/s}$ ), o  $H_s$  é a altura da fonte (em unidades de  $\text{m}$ ) e  $\delta(x)$  representa a função delta de Dirac.

O problema (3) é resolvido pela transformada de Laplace e pelo método de GILTT. Aplicando a transformada de Laplace na variável temporal, obtemos um problema estacionário, com solução conhecida e encontrada pelo método GILTT. Basicamente, a solução do problema proposto pelo método GILTT se dá nas seguintes etapas: Na etapa inicial a concentração de poluentes é expandida em série, em termos de um conjunto de funções ortogonais, obtidas da solução de um problema auxiliar de Sturm-Liouville. Substituindo esta expansão na equação de advecção-difusão estacionária, e integrando em todo o domínio, resulta em um sistema de EDO's, chamado de problema transformado. Tal problema já foi resolvido pela técnica de transformada de Laplace e diagonalização.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para as simulações, o escoamento turbulento foi assumido não-homogêneo somente na vertical ( $\partial/\partial x_1 = 0$ ,  $\partial/\partial x_2 = 0$ ,  $\partial/\partial x_3 \neq 0$ ), o transporte foi realizado pela componente longitudinal do vento médio ( $U_1 \neq 0, U_2 = 0, U_3 = 0$ ) e o tensor difusividade turbulenta foi considerado diagonal ( $K_{ij} = 0$  se  $i \neq j$ ). O domínio horizontal foi configurado com 2 Km e o domínio vertical igual à altura da CLE. Os parâmetros micrometeorológicos  $z_i = 1350 \text{ m}$ ,  $w_* = 2.3 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L = 4.8 \text{ m}$ , e  $u_* = 0.26 \text{ m}$

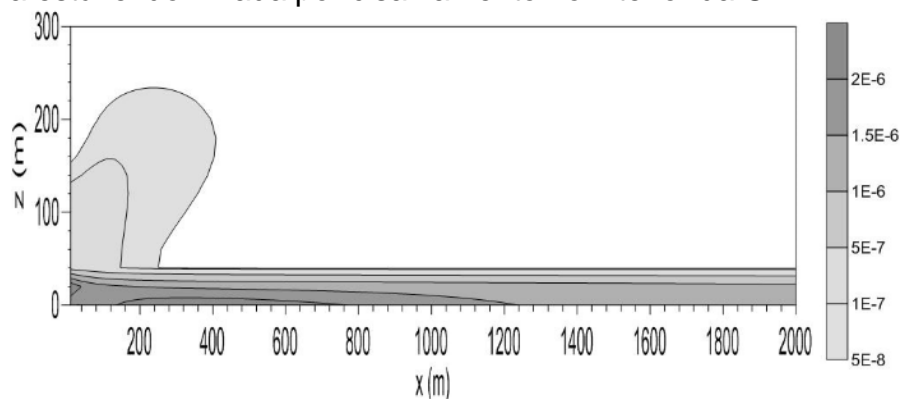
$s^{-1}$  (Nieuwstadt e Brost, 1986) foram considerados para gerar os perfis de difusividade turbulenta durante as simulações.

Foram utilizados os perfis dos coeficientes de difusão sugeridos por Degrazia et al. (2000) (Eq. 1) para simular a dispersão turbulenta na CLE. Por outro lado, as difusividades turbulentas derivadas por Goulart et al. (2007) (Eq. 2) foram usadas para simular a difusão na CR. A evolução da altura da camada limite foi calculada de acordo com a expressão  $h = 70\sqrt{t}$  obtida, a partir das medições realizadas por Anfossi et al. (1974). Durante a simulação, novos perfis de coeficientes de difusão e novos valores de altura da CLE são fornecidos para o modelo em intervalos de acordo com a Tabela 1.

$t$ (s)	900	1800
$h$ (m)	35	50

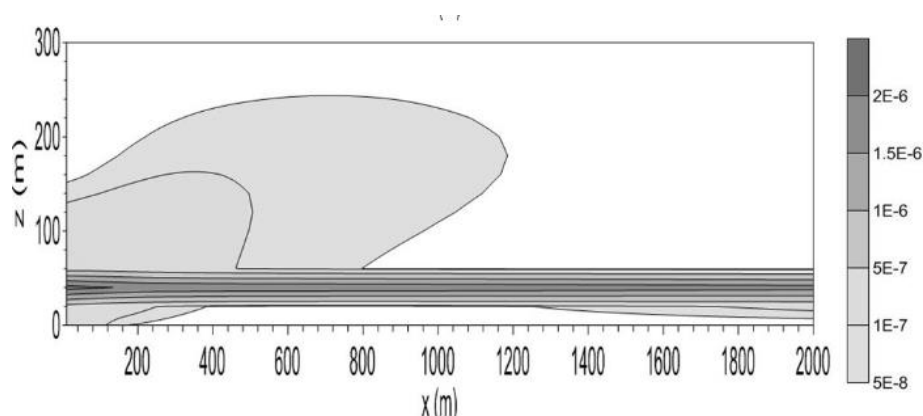
**Tabela 1:** Tempo de simulação ( $t$ ) e altura da CLE de acordo com  $h = 70\sqrt{t}$ .

A Fig. 1 mostra o efeito da dispersão para o tempo inicial de  $t=900s$  e altura da camada estável de 35m. Analisando o padrão de difusão associado a esta figura pode ser visto que os contaminantes libertados na CR sofrem uma forte ação de mistura turbulenta. Este nível de intensidade de dispersão associados à turbulência em decaimento na CR é responsável pela entrada de contaminantes no interior da CLE. O efeito de dispersão na CR sobre a pluma de contaminantes age no sentido de transportar para baixo em direção ao topo da CLE, e na sequência, é capturado por este novo ambiente com diferentes propriedades de difusão. Em seguida, a pluma de contaminantes se dispersa sob a ação da turbulência estável dominada por cisalhamento no interior da CLE.



**Figura 1:** Campo de concentração integrada (plano x-z). Altura da fonte de 60m e altura da camada limite estável de 35 m. A concentração é dado em  $gm^{-2}$ .

A Fig. 2 apresenta o resultado da simulação para o tempo de  $t=1800s$  cuja altura da camada estável é de 50m. Esta figura apresenta uma redução notável da concentração de contaminantes na superfície devido à expansão da CLE e a perda da capacidade de difusão dos turbilhões contendo energia convectiva. A perda da capacidade de difusão contribui para reduzir a entrada de contaminantes na superfície. O aprofundamento da CLE tende a engolfar a região da CR e cobre a fonte de emissão, reduzindo o processo de dispersão gerado pelos turbilhões convectivos em decaimento e como consequência, os contaminantes passam a ser emitidos em um ambiente de turbulência mecânica. Assim, a Fig. 2 mostra uma configuração na qual o máximo de concentração está cada vez mais no interior da CLE.



**Figura 2:** Campo de concentração integrada (plano x-z). Altura da fonte de 60m e altura da camada limite estável de 50 m. A concentração é dado em  $\text{gm}^{-2}$ .

## 5. CONCLUSÕES

Neste estudo, um modelo Euleriano analítico foi empregado para simular a concentração de poluentes liberados a partir de uma fonte de pontual contínua durante o período de transição dia-noite. A análise aplica-se ao modelo de dispersão parametrizado pelos coeficientes de difusão convectivos estáveis e em decomposição, representando a mistura turbulenta na CLE e CR. As simulações de concentração foram calculadas considerando diferentes momentos do processo de transição durante o período do sol. Os resultados apresentados neste artigo mostram similaridade com aqueles relatados por Carvalho et al. (2010), onde a forte ação de mistura provocada pelos redemoinhos contendo energia convectiva deteriorando na CR provoca uma entrada eficaz de poluentes para o interior da CLE recentemente criada. Durante a fase inicial, em que a CLE apresenta uma pequena profundidade, a combinação entre residual convectivo e turbilhões estáveis atuam de forma eficiente para o transporte dos poluentes em direção à superfície, aumentando a concentração no solo.

**AGRADECIMENTOS:** Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pela CAPES e CNPq.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anfossi, D.; Bacci, P. An application of Lidar technique to the study of nocturnal radiation inversion. **Journal Atmospheric Environment**, v. 8, p. 537-541, 1974.
- Carvalho, J. C.; Degrazia, G. A.; Anfossi, D.; Goulart, A. G.; Cuchiara, G. C.; Mortarini, L. Simulating characteristic patterns of the dispersion during sunset PBL. **Journal Atmospheric Research**, v. 98, p. 274-284, 2010.
- Degrazia, G.; Anfossi, D.; Carvalho, J.; Mangia, C.; Tirabassi, T.; Campos Velho, H. Turbulence parameterisation for PBL dispersion models in all stability conditions. **Journal Atmospheric Environment**, v. 34, p. 3575-3583, 2000.
- Goulart, A.; Vilhena, M.; Degrazia, G.; Flores, D. Vertical, lateral and longitudinal eddy diffusivities for a decaying turbulence in the convective boundary layer. **Journal Ecological Modelling**, v. 204, p. 516-522, 2007.
- Nieuwstadt, F. T. M.; Brost, R. A. The decay of convective turbulence. **Journal Atmospheric Sciences**, v. 43, p. 532-546, 1986.