EVOLUÇÃO DA CAMADA LIMITE PLANETÁRIA PARA DISPERSÃO DE POLUENTES PELO MÉTODO DA GILTT

Franco Caldas Degrazia[1]
Marco Tullio M. B. de Vilhena[2]
Gervásio Annes Degrazia[3]

Abstract. Due to growing concern with the air quality, new experiments have been accomplished with the objective of evaluating pollutant dispersion models. However, before we determine the dispersion coefficients, we should establish the scale parameters that describe the physical state of the planetary boundary layer. Therefore, in this work, we established the parameters of OLAD experiment (Over-Land Alongwind Dispersion), carried out in Dugway, Utah, with the pollutant release to the dawn to validate a analytical model (GILTT) that take into account the growth of the planetary boundary layer.

Resumo. Devido à crescente preocupação com a qualidade do ar, novos experimentos vêm sendo realizados com o objetivo de validar modelos de dispersão de poluentes. Porém, antes de determinarmos os coeficientes de dispersão, devemos estabelecer os parâmetros de escala que descrevem o estado físico da camada limite planetária. Logo, neste artigo, estabelecemos os parâmetros do experimento OLAD (*Over-Land Alongwind Dispersion*), realizado em Dugway, Utah, com a liberação de poluentes ao amanhecer para validar um modelo analítico (GILTT) que leva em conta o crescimento da camada limite planetária.

Palavras-chave. Camada limite planetária, parâmetros de escala, dispersão de poluentes.

INTRODUÇÃO

Existe uma vasta literatura estabelecendo as características das parametrizações e das simulações da dispersão na camada limite planetária (*CLP*). Para o crescimento desta é escarsa. Este trabalho tem como objetivo determinar os parâmetros de escala turbulentos para o crescimento da *CLP* do experimento *OLAD*. Parâmetros descrevem o estado físico da atmosfera próxima ao solo, através de escalas características presentes no campo turbulento. Na transição da noite para o dia, a determinação destes parâmetros é de fundamental importância para simulações de dispersão. Neste momento, concentrações elevadas de poluentes podem ocorrer. A estimativa da altura da *CLP* bem como a velocidade das termas dependentes do tempo foi necessária. Uma vez determinados os parâmetros, a validação destes foi realizada a partir de um modelo matemático de dispersão atmosférica para o amanhecer.

DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento *OLAD* foi conduzido de 8-25 de setembro de 1997, na localidade de Dugway, centro-oeste do estado de Utah. O teste foi realizado com a liberação de quantidades conhecidas de SF_6 ao longo de uma linha de 20 km no caso de fonte elevada (100m), e de 10 km para o caso de fonte baixa (3m). Medições das variáveis meteorológicas foram realizadas por estações, incluindo a

[1] LAC INPE - Caixa Postal 515 - CEP 12245-970 São José dos Campos, SP, Brasil franco.degrazia@lac.inpe.br
[2] PROMEC UFRGS - CEP 90050-170 - Porto Alegre – RS, Brasil vilhena@mat.ufrgs.br
[3] CCNE UFSM - CEP 97105-900 – Santa Maria – RS, Brasil degrazia@ccne.ufsm.br

liberação de radiosondas, Biltoft et al. (1999).

MODELO MATEMÁTICO

A equação da difusão-advecção para regime estacionário num sistema de coordenadas cartesianas é a equação governante no processo de dispersão do ponto de vista euleriano. Considerando a direção do vento na direção x, temos de Degrazia et al. (2001),

$$\bar{u}(z)\frac{\partial \bar{c}_y}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial \bar{c}_y}{\partial z}\right) \qquad (1)$$

onde $\bar{c}_y = \bar{c}(x,z)$ é a concentração média integrada lateralmente, $\bar{u}$ é a velocidade média do vento na direção x e K_z é o coeficiente de difusão turbulenta vertical. O lado esquerdo de (1) representa o transporte da concentração média pelo vento (advecção), enquanto que o lado direito descreve a variação do fluxo turbulento na direção vertical. Os fluxos turbulentos verticais nulos,

$$K_z \frac{\partial \bar{c}_y(x,z)}{\partial z} = 0 \qquad \text{em} \qquad z = 0\,, \qquad z = h\,, \qquad (2)$$

no solo e no topo da *CLP* são condições de contorno e ainda temos uma condição de fonte,

$$\bar{u}(z)\bar{c}_y(0,z) = Q\delta(z - H_S) \qquad \text{em} \qquad x = 0\,, \qquad (3)$$

onde H_S é a altura da fonte. Nesta equação, δ representa a função delta de Dirac dada por

$$\delta = \begin{cases} \infty, z = H_S \\ 0, z \neq H_S \end{cases}. \qquad (4)$$

Coeficientes de difusão turbulenta vertical para camada limite estável (*CLE)* e camada limite convectiva (*CLC)* foram empregados. Para *CLE* a parametrização de Degrazia et al. (2000):

$$K_z = \frac{0.3(1 - z/h)u_* z}{1 + 3.7z/\Lambda} \qquad (5)$$

onde $\Lambda = L(1 - z/h)^{5/4}$, u_* é velocidade de fricção, h é altura da *CLP* , z é altura a partir do solo e L é o comprimento de Monim-Obukhov (*M-O*). Para *CLC* de Degrazia et al. (1997), equação (6), onde w_* é a velocidade convectiva,

$$\frac{K_z}{w_* h} = 0.22\left(\frac{z}{h}\right)^{1/3}\left(1 - \frac{z}{h}\right)^{1/3}\left[1 - e^{-4z/h} - 0.0003e^{8z/h}\right]. \qquad (6)$$

A formulação de fonte pontual foi utilizada. A maneira proposta é imaginar uma fonte em linha composta de finitas fontes pontuais. A função Gaussiana foi implementada para representar o espalhamento lateral dos poluentes. Foram determinados valores dos deslocamentos laterais (σ_y) para cada experimento a partir da fórmula de Taylor (Erbrink, 2001) ,

$$\sigma_y{}^2 = 2\sigma_v{}^2 T_{Ly}{}^2\left(t/T_{Ly} + \exp\left(-t/T_{Ly}\right) - 1\right), \qquad (7)$$

[1] LAC INPE - Caixa Postal 515 - CEP 12245-970 São José dos Campos, SP, Brasil franco.degrazia@lac.inpe.br
[2] PROMEC UFRGS - CEP 90050-170 - Porto Alegre – RS, Brasil vilhena@mat.ufrgs.br
[3] CCNE UFSM - CEP 97105-900 – Santa Maria – RS, Brasil degrazia@ccne.ufsm.br

onde σ_v é o desvio padrão lateral do vento, *t* é tempo e T_{Ly} é a escala de tempo lagrangeana lateral.

PARÂMETROS TURBULENTOS DA *CLP*

Uma função linear para *1/L* foi criada para determinar o comportamento temporal de *L* na transição entre *CLE* e *CLC*. Foi utilizada a parametrização da velocidade do vento para obter u_* na camada superficial (CS), a partir da teoria de similaridade de *M-O*,

$$u = \frac{u_*}{k}\left[\ln\frac{z}{z_0} - \varphi_m\left(\frac{z}{L}\right)\right], \tag{8}$$

onde φ_m é a função de estabilidade, z_0 é a rugosidade superficial e k é constante de Von Karman (Panofsky e Dutton, 1984). Para a *CLC* temos,

$$\varphi_m = \ln\left[\left(\frac{1+x^2}{2}\right)\left(\frac{1+x}{2}\right)^2\right] - 2\cdot\arctan x + \frac{\pi}{2} \tag{9}$$

onde,

$$x = \left(1 - 16\frac{z}{L}\right)^{1/4}, \tag{10}$$

Para uma *CLE* φ_m vale:

$$\varphi_m = -5\frac{z}{L} \tag{11}$$

Para *CLP* somente estável foi utilizada a metodologia de Venkatram (1980). A estimativa para o crescimento da *CLE*, foi obtida através da fórmula sugerida por Panofsky e Duton (1984),

$$h = 0{,}4\left(\frac{u_*\cdot L}{f}\right)^{1/2}, \tag{12}$$

onde f é o parâmetro de Coriolis, definido através da taxa de rotação da terra (Ω) e latitude.

Para a *CLC* a expressão de Carson (1973) para h foi empregada (Goulart, 2005),

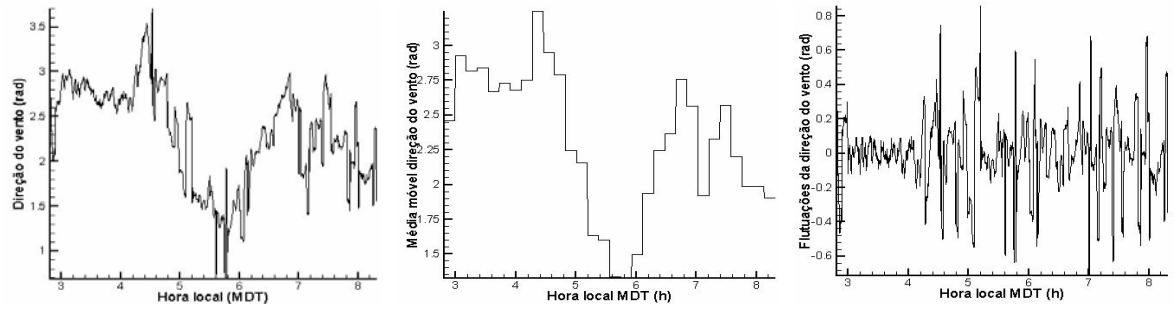
$$h^2 = \frac{2(1+2B)\left(\overline{w'T'}\right)_0}{\gamma(0)\left(\lambda^2+\Omega^2\right)}\exp(-2\lambda\cdot t)\left[\exp(\lambda\cdot t)\left(\lambda\cdot sin(\Omega\cdot t) - \Omega\cdot\cos(\Omega\cdot t) + \Omega\right)\right] \tag{13}$$

onde as constantes, $\lambda = 18\cdot10^3$ (Km^{-1}), $\gamma(0) = 0.6\cdot10^5$ (s^{-1}) e $B = 0.5$. Nesta expressão $\left(\overline{w'T'}\right)_0$ é o fluxo cinemático de calor máximo superficial (comportamento estacionário), próximo ao meio dia. Comparando valores de (13) com dados de radiosondas foi possível estimar $\left(\overline{w'T'}\right)_0$. Na *CLC*, a escala de velocidade turbulenta característica deixa de ser u_*, dando lugar a velocidade vertical convectiva w_* ou velocidade das termas. Goulart et al. (2005) estabelecem uma expressão dependente do tempo e da rotação da terra para estimar w_*,

[1] LAC INPE - Caixa Postal 515 - CEP 12245-970 São José dos Campos, SP, Brasil franco.degrazia@lac.inpe.br
[2] PROMEC UFRGS - CEP 90050-170 - Porto Alegre – RS, Brasil vilhena@mat.ufrgs.br
[3] CCNE UFSM - CEP 97105-900 – Santa Maria – RS, Brasil degrazia@ccne.ufsm.br

$$w_* = \left(\frac{g}{T} h(t) \left(\overline{w'T'} \right)_0 sin(\Omega t) \right)^{1/3} \quad (14)$$

A partir de dados da direção do vento (figura 1(a)) foi possível estimar o desvio padrão da direção do vento σ_α filtrando-se do sinal de 1(a) (Erbrink, 2001),



(a) (b) (c)

Figura 1(a): Direção do vento Olad 12, 1(b): Média móvel Olad 12, 1(c) : Flutuações do vento

lentas flutuações (figura 1(b)), que não dependem da estabilidade (meandro). No sinal das flutuações da direção, somente estão escalas responsáveis pela dispersão do poluente (difusão turbulenta), (figura 1(c)), sem escalas maiores que a dimensão da pluma, que deslocam por inteiro a pluma (advecção). Para filtragem t_m (tempo de média móvel) = T_{Ey}. T_{Ey} é a escala de tempo euleriana lateral. Assim, todas as flutuações com memória (escala de tempo associada a turbulência da direção do vento) participam da dispersão (determinação de σ_α).O valor de T_{Ey} é obtido de

$$T_{Ly} = \beta T_{Ey}, \quad (15)$$

onde $T_{Ly} = 1000s$ e $\beta = 3$ (Erbrink, 2001). Para σ_v, usando a fórmula de pequenos ângulos, temos

$$\sigma_v = \sigma_\alpha u \quad (16)$$

SOLUÇÃO VIA GILTT

A validação dos parâmetros foi realizada a partir da solução de (1) pelo método da GILTT (*Generalized Integral Laplace Transform Technique*) (Degrazia, 2005). Expandindo $\bar{c}_y$ como:

$$\bar{c}_y(x,z) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\overline{c_i}(x)\zeta_i(z)}{N_i^{1/2}}. \quad (17)$$

onde $\zeta_i(z)$ é obtido do problema auxiliar de Sturm-Liouville. Substituindo (17) em (1) e (3), aplicando o operador integral e as propriedades de ortonormalidade das autofunções, reduz-se numa equação diferencial ordinária matricial, resolvida por transformada de Laplace e diagonalização.

RESULTADOS

São apresentados os parâmetros para quatro dias de simulação. Para Olad 1, 5 e 9, vemos a tabela (1), que apresentam os valores obtidos de u_* e w_* a partir das equações (8) e (14) e valores

[1] LAC INPE - Caixa Postal 515 - CEP 12245-970 São José dos Campos, SP, Brasil franco.degrazia@lac.inpe.br
[2] PROMEC UFRGS - CEP 90050-170 - Porto Alegre – RS, Brasil vilhena@mat.ufrgs.br
[3] CCNE UFSM - CEP 97105-900 – Santa Maria – RS, Brasil degrazia@ccne.ufsm.br

de *L* para a transição. Valores de h/L, inicialmente, indicam que acima da *CS* a atmosfera exibe comportamento próximo a neutralidade. Em seguida a *CLP* passa a exibir um comportamento convectivo com valores crescentes de w_* e *h.*

Tabela 1: Parâmetros de escala turbulenta olad 12, 5 e 1.

Olad 9	$u(10m)$ (ms^{-1})	u_* (ms^{-1})	L (m)	w_* (ms^{-1})	h (m)	h/L
6:45-7:00	1,73	0,10	271,85	-	80,74	0,30
7:00-7:15	1,76	0,11	473,62	-	107,26	0,23
7:15-7:30	1,87	0,11	1837,21	-	218,13	0,12
7:30-7:45	2,12	0,13	-977,72	0,15	285,55	-0,29
7:45-8:00	2,39	0,14	-386,11	0,29	325,84	-0,84
8:00-8:15	2,07	0,13	-240,56	0,48	363,37	-1,51
8:15-8:30	1,42	0,08	-174,7	0,64	399,64	-2,29
8:30-8:45	1,64	0,10	-137,15	0,8	435,07	-3,17
8:45-9:00	1,86	0,11	-112,88	0,94	469,82	-4,16
9:00-9:15	2,09	0,13	-95,92	1,07	503,95	-5,25
9:15-9:30	2,24	0,13	-83,38	1,21	537,49	-6,45
9:30-9:45	2,70	0,16	-73,74	1,34	570,42	-7,74

Olad 5	$u(10m)$ (ms^{-1})	u_* (ms^{-1})	L (m)	w_* (ms^{-1})	h (m)	h/L
6:45-7:00	1,71	0,10	43,48	-	171,60	3,95
7:00-7:15	1,95	0,12	64,81	-	223,80	3,45
7:15-7:30	1,82	0,11	127,27	-	303,03	2,38
7:30-7:45	1,90	0,11	221,12	-	407,32	1,84
7:45-8:00	1,67	0,10	-137,25	0,18	511,60	-3,73
8:00-8:15	1,27	0,06	-67,31	0,35	575,29	-8,55

Olad 1	$u(10m)$ (ms^{-1})	u_* (ms^{-1})	L (m)	w_* (ms^{-1})	h (m)	h/L
7:30-7:45	1,61	0,098	57,81	-	169,58	2,93
7:45-8:00	1,57	0,094	231,25	-	317,57	1,37
8:00-8:15	1,88	0,112	-115,62	0,16	424,17	-3,67
8:15-8:30	1,95	0,116	-46,25	0,32	487,87	-10,55

Tabela 2: Parâmetros de escala turbulenta olad 12 e desvio padrão lateral do vento.

Olad 12	$u(10m)$ (ms^{-1})	u_* (ms^{-1})	L (m)	w_* (ms^{-1})	h (m)	h/L
4:00-4:15	3,30	0,19	195,73	-	38,90	5,03
4:15-4:30	2,91	0,15	142,35	-	25,44	5,60
4:30-4:45	2,80	0,14	126,32	-	21,70	5,82
4:45-5:00	2,51	0,10	72,73	-	10,39	7,00
5:00-5:15	2,91	0,15	142,61	-	25,51	5,59
5:15-5:30	2,45	0,14	125,54	-	21,52	5,83
5:30-5:45	2,81	0,14	127,45	-	21,96	5,80
5:45-6:00	2,92	0,15	143,87	-	25,81	5,57
6:00-6:15	2,40	0,14	121,41	-	20,58	5,90

	σ_v $(rad.m/s)$
Olad 1	0,27
Olad 5	0,11
Olad 9	0,22
Olad 12	0,13

No experimento 12, tabela (2), foram obtidos u_* e *L* a partir de Venkatram (1980). Valores de $h/L > 5$ indicam uma estratificação acentuada na *CLE*. Vemos, também, os valores obtidos para σ_v para cada experimento. Na figura (2), temos os coeficientes de difusão variando no tempo e o crescimento da *CLP* para uma simulação. Na tabela (3), estão os resultados da simulação de dispersão em comparação com os dados observados de concentração em três distâncias diferentes da fonte. Foram realizadas médias de uma hora para comparação. Ainda na tabela (3) são apresentados índices estatísticos. Um coeficiente de correlação (Cor) alto (em torno de 85 %) e um fator de dois (Fa2) de 78 % foram observados.

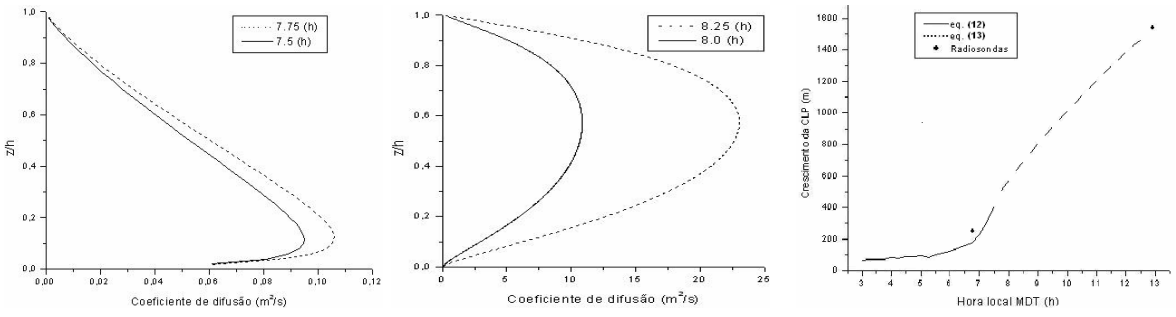


Figura 2: Coeficiente de difusão estável e instável para dois horários e crescimento da *CLP*

[1] LAC INPE - Caixa Postal 515 - CEP 12245-970 São José dos Campos, SP, Brasil franco.degrazia@lac.inpe.br
[2] PROMEC UFRGS - CEP 90050-170 - Porto Alegre – RS, Brasil vilhena@mat.ufrgs.br
[3] CCNE UFSM - CEP 97105-900 – Santa Maria – RS, Brasil degrazia@ccne.ufsm.br

CONCLUSÃO

Os parâmetros de escala turbulenta para o crescimento da camada limite planetária são essenciais para o modelamento dispersivo atmosférico ao amanhecer (momento crítico de liberação de poluentes). Parâmetros de escala para uma *CLP* bem desenvolvida subestimariam concentrações de poluentes. A variação temporal dos parâmetros permitiu uma variação temporal indireta no cálculo de concentrações. Com o modelo matemático proposto, foi possível obter resultados aceitáveis do ponto de vista estatístico de concentrações. Provou-se aplicável em situações de fonte em linha tanto para fonte baixa como para fonte elevada. Na continuação deste trabalho pretende-se aprimorar o modelo matemático, incluindo uma variação temporal da concentração.

Tabela 3: Concentrações superficiais médias por linha de amostragem e índices estatísticos.

Olad 1	x (m)	Dados - Co (*pptv*)	GILTT - Cp (*pptv*)
7:30-8:30	2000	6911,63	3863,65
7:45-8:45	5000	3985,31	2236,99
Olad 5			
6:45-7:45	2000	8585,5	11807,28
7:15-8:15	5000	4110,85	914,43
Olad 9			
8:45-9:45	10000	391,20	355,85
9:00-10:00	15000	145,38	258,22
Olad 12			
4:15-5:15	2000	7625,59	16942,12
5:00-6:00	5000	4246,49	6369,42
5:30-6:30	10000	1602,09	3326,32

Modelo	NMSE	COR	FA2	FB	FS
GILTT	0,39	0,848	0,778	-0,13	-0,450

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Biltoft, C. A., Turley, S. D., Watson, T. B., Crescenti, G. H., Carter, R. G., 1999. "Over-Land Atmospheric Dispersion (OLAD) Test Summary and Analysis", Customer Report, U.S. Army Dugway Proving Ground, USA.

Degrazia, G. A., Velho, H. F. C., Carvalho, J. C., 1997. "Nonlocal exchange coefficients for the convective boundary layer derived from spectral properties", Contributions to Atmosph. Phys., pp. 57-64.

Degrazia, G. A., Anfossi, D., Carvalho, J. C., Mangia, C., Tirabassi, T., Campos Velho, H. F., 2000. "Turbulence parameterisation for PBL dispersion models in all stability conditions", Atmospheric Environment, vol. 34, pp. 3575-3583.

Degrazia, G. A., Moreira, D. M., Vilhena, M. T., 2001. "Derivation of an eddy diffusivity depending on source distance for vertically inhomogeneous turbulence in a convective boundary layer", Journal of Applied Meteorology, pp.1233-1240.

Degrazia, F. C., 2005. "Evolução da camada limite planetária para dispersão de poluentes pelo método da GILTT, Dissertação de mestrado, Promec, UFRGS.

Erbrink, J.J., 2001. "A practical model for the calculation of σ_y and σ_z for use in on-line gaussian dispersion model for tall stacks, based on wind fluctuations", Atmospheric Environment, vol. 25A, pp. 277-283.

Goulart, A. G., Moreira, D. M., Vilhena, M. T., 2005. "A new growing model for the CBL: application to pollutant dispersion simulation by the GILTT method ", Personal Communication.

Panofsky, H. A. and J. A. Dutton, 1984: Atmospheric Turbulence, Wiley & sons, N.Y., 397 pp.

Venkatram, A., 1980. "Estimating the Monim-Obukhov length in the stable boundary layer for dispersion calculations", Boundary-Layer Meteorology, vol. 19 (4), pp. 481-485.

[1] LAC INPE - Caixa Postal 515 - CEP 12245-970 São José dos Campos, SP, Brasil franco.degrazia@lac.inpe.br

[2] PROMEC UFRGS - CEP 90050-170 - Porto Alegre – RS, Brasil vilhena@mat.ufrgs.br

[3] CCNE UFSM - CEP 97105-900 – Santa Maria – RS, Brasil degrazia@ccne.ufsm.br