

# COMPARATIVO DA ALTURA DA CAMADA DE MISTURA ATMOSFÉRICA POR ESTIMATIVA SEMI-EMPÍRICA EM RELAÇÃO A ALTURA POR PERFIL DA TEMPERATURA POTENCIAL

Nathany Ono de Souza<sup>1</sup>; Carlos Henrique Portezani<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Estudante do Curso de Licenciatura em Física da UEMS, Unidade Universitária de Dourados; E-mail: nathanyono.s@gmail.com; Bolsista PIBIC/UEMS;

<sup>2</sup> Pesquisador do Centro Integrado de Análise e Monitoramento Ambiental – CInAM/UEMS, Professor Doutor do Curso de Licenciatura em Física e Engenharia Física da UEMS, Unidade Universitária de Dourados; E-mail: carlos@uems.br

Área de Conhecimento do CNPq: Ciências Exatas e da Terra.

## Resumo

A altura da camada de mistura atmosférica é importante nos estudos dos fenômenos de poluição de ar, sendo esta determinada, geralmente, por métodos empíricos. O objetivo desta pesquisa é realizar uma comparação entre alturas de camada de mistura obtidas através de um método semi-empírico, utilizando parâmetros meteorológicos de superfície, com alturas obtidas através da análise do perfil vertical da temperatura potencial atmosférica, o qual se caracteriza com um método empírico. Os parâmetros meteorológicos utilizados para a aplicação dos métodos foram adquiridos para um período de 11 anos envolvendo 18 estações meteorológicas situadas no Brasil. A adequação dos parâmetros meteorológicos e a implementação dos métodos foi realizada no ambiente de programação *Scilab* ou similar. A análise comparativa entre as alturas foi estabelecida através do cálculo dos desvios relativos percentuais médios e dos desvios padrões destes desvios, nos horários AM e PM e em terreno urbano e rural. As comparações foram efetuadas para condições de estabilidade atmosféricas estáveis e neutras, pois para condições instáveis os parâmetros meteorológicos adquiridos eram insuficientes para aplicação do método semi-empírico. Em geral, os desvios relativos percentuais médios foram elevados, entretanto, para condições de estabilidade estáveis os desvios foram menores quando comparados as condições de estabilidade neutra. Observando os resultados obtidos em relação ao resultado de outra pesquisa, surge a hipótese que talvez fatores geográficos, podem estar exercendo maior influência no método semi-empírico, portanto, um próximo passo a ser analisado em pesquisas futuras.

Palavras-chave: Estratificação da atmosfera. Camada limite planetária. Poluição do ar.

## 1. Introdução

A compreensão da estratificação em camadas da atmosfera é de grande importância no estudo de problema de poluição do ar, principalmente da região denominada *camada limite planetária* (CLP) (ZANNETTI, 1990) ou *camada limite atmosférica* (CLA) (AZAD, 1993). Esta camada pode ser subdividida em três distintas estruturas, presentes em um ciclo diário as quais são: a camada de mistura (muito turbulenta), a camada residual (pouco turbulenta) e a camada limite estável (noturna e de turbulência esporádica).

Um dos principais parâmetros atribuídos a camada de mistura atmosférica é a sua altura, pois além de aplicações em fenômenos climáticos e meteorológicos, é fundamental sua utilização na análise e modelagem da qualidade do ar, pois determina qual é o volume disponível para a dispersão de poluentes na atmosfera.

A finalidade deste trabalho foi determinar o comportamento do método de estimativa semi-empírica, para obtenção do valor da altura da camada de mistura atmosférica, em relação ao método de análise do perfil vertical de temperatura potencial da atmosfera, o qual se apresenta como um método já consagrado cientificamente.

### 1.1 Determinação da Altura da Camada de Mistura

A altura da camada de mistura pode ser obtida através da análise do perfil vertical da temperatura potencial atmosférica, pois nesta camada a temperatura potencial permanece constante com a altitude. Na Figura 1 tem-se a representação de um perfil de temperatura potencial mostrando as estruturas da camada limite atmosférica.

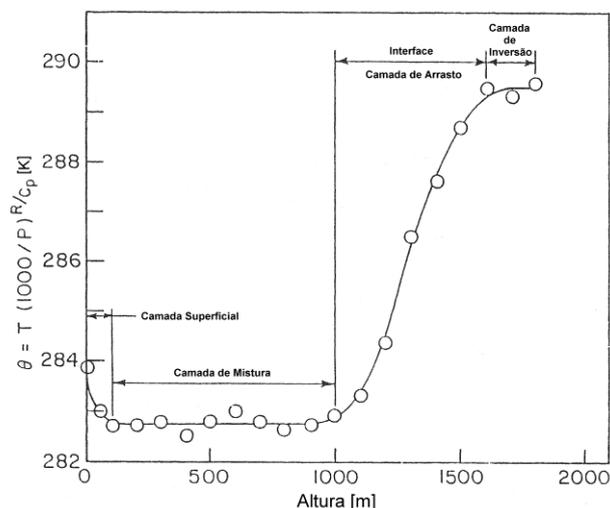


Figura 1: Variação da temperatura potencial ( $\theta$ ) na camada limite atmosférica (AZAD, 1993).

Outro método de se obter a altura da camada de mistura é através de uma estimativa semi-empírica, o qual relaciona o valor da altura da camada de mistura com outras grandezas atmosféricas, tal como apresentado na Tabela 1 e complementado pelas Tabelas 2 e 3.

Tabela 1 – Equações para determinação da altura da camada de mistura pelo método semi-empírico para as condições de estabilidade atmosférica segundo Zannetti (1990).

Estabilidade Atmosférica	Altura da Camada de Mistura $h_m$	Valor da Constante $C_1$ ou $C_2$
<b>Instável</b>	$\frac{2}{\rho c_p [T(t) - T(t_0)]} \int_{t_0}^t H dt$	
<b>Neutra</b>	$C_1 \frac{u_*}{f}$	0,15 a 0,25
<b>Estável</b>	$C_2 \sqrt{\frac{u_* L}{f}}$	0,4

Sendo:  $\rho$  a densidade do ar,  $c_p$  o calor específico a pressão constante por unidade de massa de ar,  $T(t)$  a temperatura próxima a superfície do solo em um tempo  $t$  após o nascer do sol,  $T(t_0)$  a temperatura próxima a superfície do solo no nascer do sol,  $H$  o fluxo de calor superficial próximo ao solo,  $u_*$  a velocidade de cisalhamento do vento,  $L$  o comprimento Monin-Obukhov e  $f$  o parâmetro de Coriolis, definido por:  $f = 2\Omega \sin\phi$ ; onde,  $\Omega$  é a taxa de rotação da terra igual a  $7,29 \times 10^{-5}$  rotações/s (ZANNETTI, 1990),  $\phi$  é a latitude do local em valores radianos e absolutos.

Tabela 2 – Equações para a velocidade de cisalhamento do vento  $u_*$  e para o comprimento Monin-Obukhov  $L$ .

		$u_*$	$L$
<b>Equações do Tipo 1</b>	$u_*$ segundo Stull (2000) e	$\frac{k u(z)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \frac{6z}{L}}$	$\frac{1}{a z_0^b}$
	$L$ segundo Zannetti (1990)		
<b>Equações do Tipo 2</b>	$u_*$ segundo Zannetti (1990) e	$\frac{k u(z)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$	$\frac{1}{a + b \log z_0}$
	$L$ segundo Seinfeld (1997)		

Sendo:  $k$  a constante de von Karman igual a 0,4 (ZANNETTI, 1990),  $z$  a altura do anemômetro em relação ao solo,  $z_0$  o comprimento de rugosidade da superfície que caracteriza o local próximo a estação,  $u(z)$  a velocidade do vento em uma altura  $z$  em relação ao solo e  $a$  e  $b$  coeficientes dados pela Tabela 3, de acordo com as classes de estabilidades atmosféricas do local.

Tabela 3 – Valores dos coeficientes  $a$  e  $b$ , segundo as classes de estabilidades atmosféricas, para as equações que determinam o comprimento Monin-Obukhov. Tabela adaptada de Zannetti (1990).

Classe de Estabilidade Atmosférica		Coefficiente $a$	Coefficiente $b$
Neutra	D ou 4	0	0
Estáveis	E ou 5	0,00807	- 0,3049
	F ou 6	0,03849	- 0,1714

## 2. Materiais e Métodos

Os valores das alturas da camada de mistura, obtidos através do perfil vertical da temperatura potencial encontrado na base de dados de observação da atmosfera superior da

Universidade de Wyoming, foram tomados somente para os horários 00GMT (AM) e 12GMT (PM). Os arquivos de dados meteorológicos horários de superfície, para aplicação do método semi-empírico foram obtidos da base de dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil, sendo estes ajustados de modo a termos dois tipos de conjunto de arquivos, Tipo A e Tipo B, de acordo com a possível duplicação da variável velocidade do vento em alguns horários nos arquivos utilizados. Posteriormente, estes arquivos foram processados pelo pré-processador meteorológico PCRAMMET, gerando assim as classes de estabilidades atmosféricas.

O cálculo das alturas da camada de mistura semi-empíricas foi realizado através das equações, Tipo 1 e Tipo 2 apresentados na Tabela 2, gerando assim arquivos meteorológicos dos Tipos 1A, 1B, 2A e 2B. Para condições de estabilidade instáveis o cálculo não foi realizado devido à falta do parâmetro meteorológico fluxo de calor superficial.

Os valores das alturas da camada de mistura AM e PM semi-empíricas, para terreno do tipo rural ( $z_0$  igual a 0,25m) e urbano ( $z_0$  igual a 1m), foram comparados com os valores das alturas da camada de mistura obtidas pelo perfil vertical da temperatura potencial, sendo a análise da comparação realizada através de desvios relativos percentuais e dos desvios padrões destes desvios. Valores da constante  $C_1$  (observar Tabela 1) foram obtidos, em uma segunda etapa, de modo a anular o desvio relativo percentual médio nos casos analisados, obtendo-se assim a média ajusta da constante  $C_1$ , a qual foi confrontada com os valores sugeridos por Zannetti (1990).

Todos os procedimentos foram implementados através de softwares desenvolvidos no ambiente de programação *Scilab* ou similar devido ao grande número de análises efetuadas, relacionadas aos arquivos anuais de parâmetros meteorológicos horários de 18 estações meteorológicas situadas no Brasil, para um período entre os anos de 2000 a 2010.

### **3. Resultados e Discussão**

A Tabela 4 apresenta os valores dos desvios relativos percentuais médios entre as alturas da camada de mistura semi-empíricas em relação às alturas da camada de mistura obtidas pelo método do perfil vertical da temperatura potencial para as situações AM rural, PM rural, AM urbana e PM urbana, para as condições de estabilidade atmosférica neutra e estável.

Na Tabela 5 temos as médias dos valores ajustados para a constante  $C_1$  da equação para altura da camada de mistura com classe de estabilidade neutra (Tabela 1) que tornam

nulos os desvios relativos percentuais, para as situações AM rural, PM rural, AM urbana e PM urbana, para os quatro tipos de arquivo de parâmetros meteorológicos.

Através da Tabela 4 observa-se o aumento do desvio relativo porcentual médio conforme o valor da constante  $C_I$  da equação para altura da camada de mistura com classe de estabilidade neutra (Tabela 1) aumenta. Entretanto, mesmo com a constante  $C_I$  igual a 0,15, os desvios relativos percentuais médios apresentaram valores muito elevados. Para condições de estabilidade atmosféricas estáveis os desvios se apresentam menores, embora ainda sejam de valores consideráveis.

Tabela 4 – Desvios relativos percentuais médios das alturas da camada de mistura AM rural, PM rural, AM urbana e PM urbana estimadas pelo método semi-empírico em relação a estas alturas obtidas através da análise do perfil vertical de temperatura potencial para arquivos de parâmetros meteorológicos horários de superfície dos tipos 1A, 1B, 2A e 2B das 18 estações analisadas entre os anos 2000 e 2010, para constante  $C_I$  igual a 0,15 e em condições de estabilidade atmosférica neutra e estável.

ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA		NEUTRA										ESTÁVEL		
CONSTANTE $C_I$		0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25		
TIPO DE ARQUIVO		1A, 1B, 2A e 2B										1A, 1B e 2B	2A	
R U R	NA	3825	3825	3825	3825	3825	3825	3825	3825	3825	3825	3825	12362	12362
	DRPM (%)	2423	2591	2759	2928	3096	3264	3432	3600	3769	3937	4106	44	-44
	DPDRPM (%)	5788	6173	6559	6945	7331	7717	8103	8489	8875	9260	9647	281	134
A L M	NA	12930	12930	12930	12930	12930	12930	12930	12930	12930	12930	12930	12930	1339
	DRPM (%)	2090	2235	2381	2527	2673	2819	2965	3111	3257	3403	3550	43	-59
	DPDRPM (%)	4475	4773	5071	5370	5668	5967	6265	6563	6862	7160	7459	158	44
U R B	NA	3825	3825	3825	3825	3825	3825	3825	3825	3825	3825	3825	12362	12362
	DRPM (%)	3943	4212	4481	4751	5020	5290	5559	5829	6098	6358	6572	118	153
	DPDRPM (%)	9273	9891	10509	11127	11745	12363	12982	13600	14218.5	14827	15224	423	496
A N A	NA	12930	12930	12930	12930	12930	12930	12930	12930	12930	12930	12930	12930	1339
	DRPM (%)	3408	3642	3876	4110	4344	4578	4810	5044	5278	5470	5587	123	146
	DPDRPM (%)	7170	7647	8125	8603	9081	9559	10036	10514	10992	11356	11508	247	272

Sendo: NA: número de amostras; DRPM: desvio relativo porcentual médio da altura estimada pelo método semi-empírico e a altura obtida da análise do perfil vertical de temperatura potencial, DPDRPM: desvio padrão em torno do desvio porcentual médio.

Tabela 5 – Média dos valores ajustados para a constante  $C_I$  equação para altura da camada de mistura com classe de estabilidade neutra (Tabela 1), número de amostras e desvio padrão em torno da média das constantes, para estimativa semi-empírica das alturas da camada de mistura AM rural, PM rural, AM urbana e PM urbana, em classes de estabilidades atmosféricas neutras, para arquivos de parâmetros meteorológicos horários de superfície dos tipos 1A, 1B, 2A, 2B, das 18 estações entre os anos 2000 e 2010.

TIPO DO ARQUIVO	1A, 1B, 2A e 2B				
	SITUAÇÃO	AM RURAL	PM RURAL	AM URBANA	PM URBANA
NÚMERO DE AMOSTRAS		3825	12930	3825	12930
VALOR MÉDIO DA CONSTANTE $C_I$		0,053	0,073	0,033	0,045
DESVIO PADRÃO		0,078	0,102	0,049	0,063

Observando a Tabela 5 nota-se que os valores médios encontrados para as constantes  $C_I$ , em todos os casos foram menores que 0,1. Estes valores estão abaixo do valor proposto por Zanetti (1990) e encontrado por Portezani (2010), onde foi realizada uma pesquisa semelhante a esta, porém somente para a estação meteorológica situada no Campo de Marte, na cidade de São Paulo, Brasil.

#### **4. Conclusões**

Pode-se concluir que o método semi-empírico, independente do conjunto de equações utilizado, obteve valores para a altura da camada de mistura que diferem, consideravelmente, dos valores empíricos obtidos através do perfil vertical da temperatura potencial. Considerando a pesquisa realizada por Portezani (2010) surge a hipótese que talvez fatores geográficos possam estar exercendo maior influência no método semi-empírico, portanto, um próximo passo a ser analisado em pesquisas futuras.

#### **5. Agradecimentos**

Os autores agradecem a Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul pela bolsa concedida através do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil e a Universidade de Wyoming pela cessão dos arquivos meteorológicos.

#### **6. Referências**

AZAD, R. S. **The atmospheric boundary layer for Engineers**. Kluwer Academic Publishers, 1993. 596 p.

PORTEZANI, C. H. **Desenvolvimento de um método e aplicativo para utilização de modelos na avaliação contínua de concentrações de poluentes atmosféricos**. Tese - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. 319 p.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric Chemistry and Physics: from air pollution to climate change**. New York, NY: John Wiley & Sons, 1997. Cap.16, Micrometeorology, p. 841-879.

STULL, R. B. **Meteorology for scientists and engineers**. 2. ed. Pacific Grove, CA: Brooks Cole, 2000. 528 p.

ZANNETTI, P. **Air pollution modeling: theories, computational methods and available software**. New York, NY: Van Nostrand Reinhold, 1990. 454 p.