

CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA E A DISPERSÃO DE POLUENTES: ESTUDO DE CASO NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM-PA

Edmir dos Santos Jesus^{1,2}, Nilzele de Vilhena Gomes Jesus³

¹ Instituto Tecnológico Vale, ITV

² Curso de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, UNIASSELVI

³ Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia, CENSIPAM

Resumo

O objetivo deste estudo foi identificar as características da Camada Limite Atmosférica (CLA), estimando sua altura, entre o final do dia 10 e manhã do dia 11 de agosto de 2022 em Belém-PA, devido a presença de fumaça nas primeiras horas da manhã. Foram utilizados os dados de sondagens atmosféricas das 21:00 do dia 10 e 09:00 do dia 11 hora local (HL), do Aeroporto Internacional de Belém. Para avaliar as condições de superfície utilizou-se também dos dados da estação meteorológica do Instituto Tecnológico Vale instalada no campus da Universidade Federal do Pará, cujo os resultados mostraram que as condições em superfície estavam desfavoráveis para dispersão de poluentes. O topo da CLA foi identificado através de três metodologias: perfil vertical das temperaturas potencial e potencial virtual, da razão de mistura e da pressão diferencial de saturação. A CLA estava rasa na capital no final do dia 10 e manhã do dia 11, com topo em 1000 hPa (113 m) às 00Z (21:00HL) e em 970 hPa (391 m) às 12Z (09:00HL). Além disso, a CLA apresentou características de uma atmosfera estável, sobretudo no horário noturno, com uma camada de inversão térmica, favorecendo a presença da fumaça na região.

Palavras-chave: fumaça; inversão térmica; pressão diferencial de saturação

Abstract

The objective of this study is to identify the characteristics of the Atmospheric Boundary Layer (ABL), estimating its height, from the end of the 10th and the morning of August 11, 2022 in Belém-PA, due to the presence of smoke in the early hours of the morning. Atmospheric sounding data from 21:00 on the 10th and 09:00 on the 11th local time (LT) from Belém International Airport were used. To evaluate the surface conditions, data from the meteorological station of the Vale Technological Institute were also used, whose results showed that the surface conditions were unfavorable for the dispersion of pollutants. The top of the ABL was identified through three methodologies: vertical profile of potential and virtual potential temperatures, mixing ratio and saturation differential pressure. The CLA was shallow in capital at the end of the 10th and in the morning of the 11th, with a top at 1000 hPa (113 m) at 00Z and at 970 hPa (391 m) at 12Z. In addition, the ABL showed characteristics of a stable atmosphere, especially at night, with a layer of thermal inversion, which favored the presence of smoke in the region.

Keywords: smoke; thermal inversion; saturation differential pressure.

1. Introdução

A Camada Limite Atmosférica (CLA) é definida como a porção mais baixa da troposfera, onde ocorrem as principais trocas de energia entre a superfície e a atmosfera, controladas pelos transportes turbulentos. É fundamental o conhecimento da variabilidade desta camada, sobretudo a sua altura, a qual está associada com as condições de estabilidade atmosférica, se propícia ou não para formação de tempestades, dispersão de poluentes, etc.

A CLA apresenta variação diurna de temperatura, devido ao aquecimento e resfriamento da superfície. Durante o dia o topo da CLA pode alcançar os 2 km e a noite sua espessura diminui significativamente, podendo ser inferior a 100 m (PANOFSKY; DUTTON, 1984). Santos (2005) verificou que sobre uma área de pastagem na Amazônia, que a espessura da CLA esteve entre 274 m e 366 m. Betts *et al.* (2009) também estudaram a CLA da Amazônia e mostraram que o

topo da CLA pode variar entre 700 m a 1100 m à tarde no período chuvoso.

A estabilidade atmosférica influencia diretamente a concentração de poluentes na atmosfera. Numa atmosfera estável, os movimentos de convecção e turbulência são inibidos, o que contribui para a manutenção de altas concentrações de poluentes. Por outro lado, numa atmosfera instável, os movimentos convectivos e a turbulência do ar são favorecidos, promovendo a dispersão de poluentes na atmosfera (ZHANG et al., 2012; CRAWFORD, et al., 2015; WANG, et al., 2016). As inversões de temperatura também tendem a agravar eventos de poluição, pois quando ocorrem próximas da superfície, impedem a dispersão dos poluentes para níveis mais elevados da atmosfera, provocando, assim, o aumento da quantidade de poluição na baixa troposfera (CARVALHO et. al., 2013). Além disso, a dispersão de poluentes é influenciada pelo tempo meteorológico em superfície, pois em condições de ventos intensos e alta precipitação, os poluentes registram menores concentrações, porém na ausência de precipitação, pouca nebulosidade e ventos fracos a dispersão dos poluentes é desfavorecida (CARVALHO et al., 2012; JANJAI et al., 2016).

O objetivo deste estudo foi identificar as características da CLA, estimando sua altura, no final do dia 10 e manhã do dia 11 de agosto de 2022 em Belém-PA, quando foi identificada a ocorrência de fumaça na capital paraense.

2. Materiais e métodos

Para alcançar o objetivo deste estudo foram utilizados os dados de sondagens atmosféricas de ar superior do Aeroporto Internacional de Belém (SBBE), de coordenadas geográficas 1.38°S; 48.48°W; 16 m, nos horários 00Z e 12Z, que correspondem às 21:00 hora local (HL) do dia anterior e 09:00 HL do dia 11 de agosto de 2022, quando foi identificada a presença de fumaça próximo da superfície nas primeiras horas da manhã. Para avaliar as condições de tempo presente na superfície foram utilizados os dados de temperatura do ar (máxima e média), umidade relativa e velocidade do vento (máxima e média) da estação meteorológica do Instituto Tecnológico Vale (ITV) instalada no campus da Universidade Federal do Pará, nas coordenadas geográficas 1.47°S; 48.45°W; 11 m.

Foram aplicadas três metodologias para identificar o topo da CLA no dia do evento: A primeira através dos perfis verticais da temperatura potencial (Θ) e temperatura potencial virtual (Θ_v), calculadas através das equações (1) e (2), pois Stull (1988) constatou que dentro desta camada Θ e Θ_v possuem valores aproximadamente constantes com a altura e ao atingirem o topo da CLA o gradiente destes parâmetros apresentam uma inclinação profunda, aumentando com a altura. A segunda utilizando o perfil da razão de mistura (r), calculado através da equação (3), pois o topo da CLA é identificado no ponto que ocorre uma inclinação profunda, diminuindo seu valor com a altura (BOLTON, 1980; BETTS, 2002).

A terceira metodologia aplicada foi através do perfil vertical da Pressão Diferencial de Saturação (PDS), definida como a diferença entre a pressão do nível de condensação por levantamento e a pressão atmosférica, equação (4), a qual depende da Temperatura do Nível de Condensação por Levantamento, calculado através da equação (5), desenvolvida por Betts (2002). A inversão dos valores de PDS, com a altura, rumo aos menores valores, define o topo da CLA (BETTS; ALBRECHT, 1987).

$$\Theta = T_{ar} \times \left(\frac{1000}{P}\right)^{0,287} \quad (1)$$

$$\Theta_v = \Theta (1 + 0,61 \times r) \quad (2)$$

$$PDS = P_{ncl} - P \quad (3)$$

$$P_{ncl} = 1000 \times \left(\frac{T_{ncl}}{\Theta}\right)^{3,496} \quad (4)$$

$$T_{ncl} = 55 + \left(\frac{2840}{(3,5 \times \ln(\Theta) - \ln\left(\frac{1000 \times r}{622+r}\right)) - 4,805}\right) \quad (5)$$

Em que: Θ é a temperatura potencial (K), T_{ar} é a temperatura do ar em (K), P é a pressão atmosférica (hPa), Θ_v é a temperatura potencial virtual (K), r é a razão de mistura (g/g), PDS é a pressão diferencial de saturação (hPa), P_{ncl} é a pressão do nível de condensação por

levantamento (hPa) e T_{ncl} é a temperatura do nível de condensação por levantamento (K).

3. Resultados

No começo da manhã do dia 11 de agosto de 2022, várias imagens foram divulgadas pela imprensa local que mostravam a presença de fumaça em vários pontos da Região Metropolitana de Belém (RMB), conforme mostra a Figura 1. Segundo a reportagem houveram informações de que em grande parte da RMB estava tomada pela fumaça. As condições de tempo em superfície na estação do ITV apontaram que na madrugada do dia 11 a temperatura mínima do ar foi de 22,3°C e perdurou próximo deste valor até o começo da manhã, enquanto que a umidade relativa oscilou entre 84% e 96 % (Figura 2a). A velocidade do vento variou de 0,5 a 1,6 m/s, ou seja, de fraca intensidade (Figura 2b). Não houve registro de chuva entre às 12:00 HL do dia 10 e 12:00 HL do dia 11. A variação da temperatura mínima no período da madrugada pode estar associada a ausência ou pouca nebulosidade. Portanto, as condições em superfície tiveram características de um ambiente que desfavoreceu a dispersão de poluentes.



Figura 1. Imagem da presença de fumaça ocorrida na Região Metropolitana de Belém, às 06:14 (hora local) do dia 11/08/2022. Fonte: <https://globoplay.globo.com/v/10839234/> acessado em 30/08/2022.

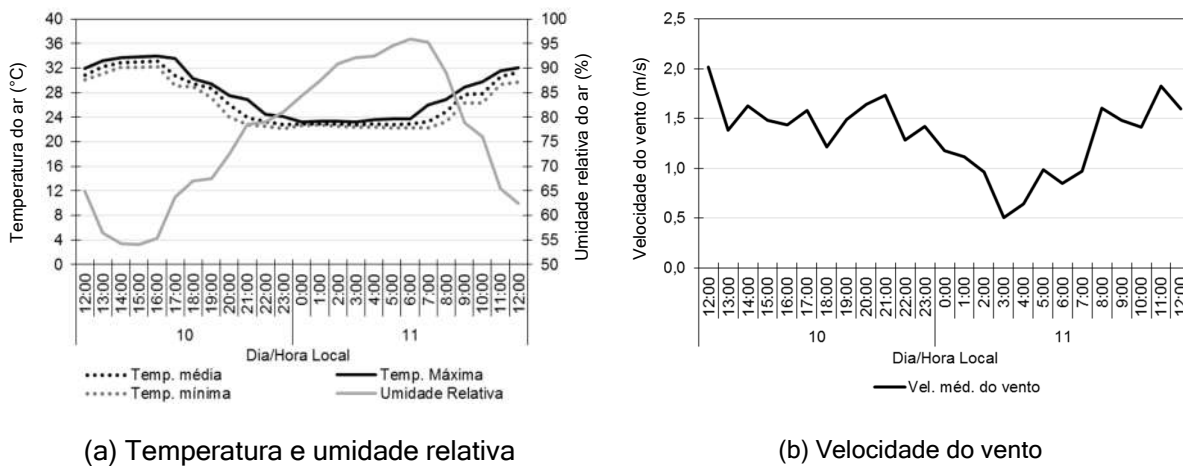
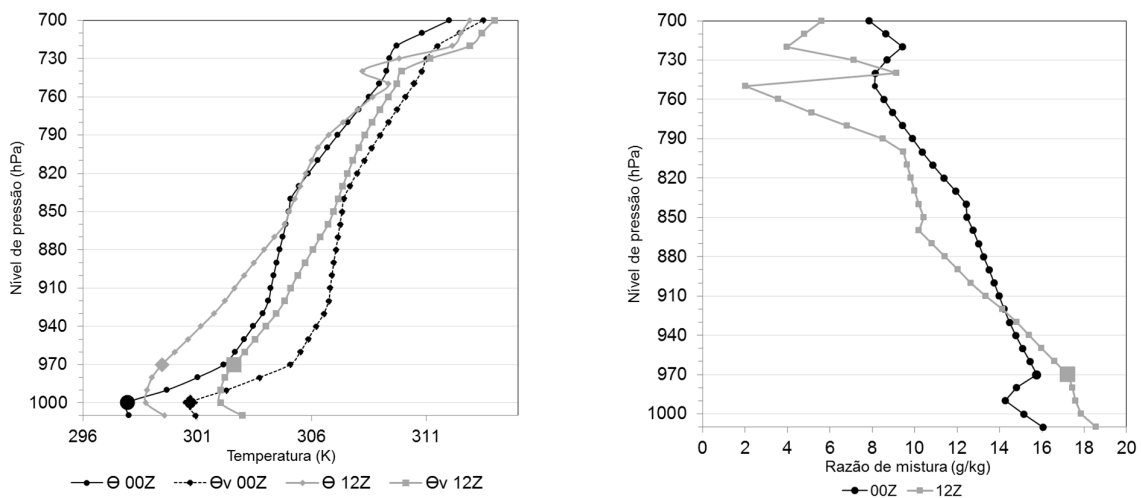


Figura 2 – Distribuição horária dos elementos meteorológicos em superfície. (a) temperatura média, máxima e mínima do ar e umidade relativa registrados na estação meteorológica do ITV/UFPA e (b) velocidades média e máxima do vento em 10 m do dia 10 a 11/08/2022.

A Figura 3 apresenta os dados de ar superior do dia 11 de agosto às 00Z e 12Z, correspondente às 21:00 HL do dia anterior e às 09:00 HL do dia corrente, respectivamente. No

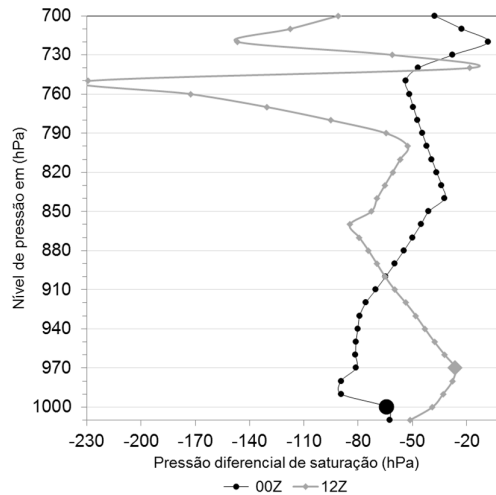
período noturno a atmosfera se apresentou estável, com $\partial\theta/\partial z > 0$ e $\partial\theta_v/\partial z > 0$, na camada entre 1000 hPa e 940 hPa. Por outro lado, no período matutino, a atmosfera esteve neutra ($\partial\theta/\partial z \approx 0$ e $\partial\theta_v/\partial z \approx 0$) até o nível de 970 hPa (391 m), e acima deste nível a camada estava estável (Figura 3a). Quanto à altura da CLA, de acordo com o perfil vertical de Θ e Θ_v , o topo esteve em 1000 hPa (113 m) às 00Z e 970 hPa (391 m) às 12Z. No perfil vertical de r , foi possível observar o topo da CLA na mesma altura vista nos perfis de Θ e Θ_v para às 12Z, porém às 00Z a mesma não foi identificada em 1000 hPa, pois houve uma inversão de r próximo da superfície (aumento de r com a altura), entre os níveis de 1000 hPa e 970 hPa, o que é típico de uma camada estável (Figura 3b). No perfil vertical de PDS o topo da CLA foi identificado na mesma altura verificada nos perfis verticais de Θ e Θ_v , tanto para 00Z quanto para 12Z (Figura 3c).

Santos (2005) mostrou que o topo da CLA noturna, cuja a espessura é menor que do período diurno, sobre uma área de pastagem na Amazônia, durante o período seco, esteve entre 274 m e 366 m. Com isso, tanto período noturno quanto no período diurno, a CLA esteve rasa desde à noite do dia 10 até a manhã do dia 11 de agosto de 2022.



(a) Temperatura potencial e potencial virtual

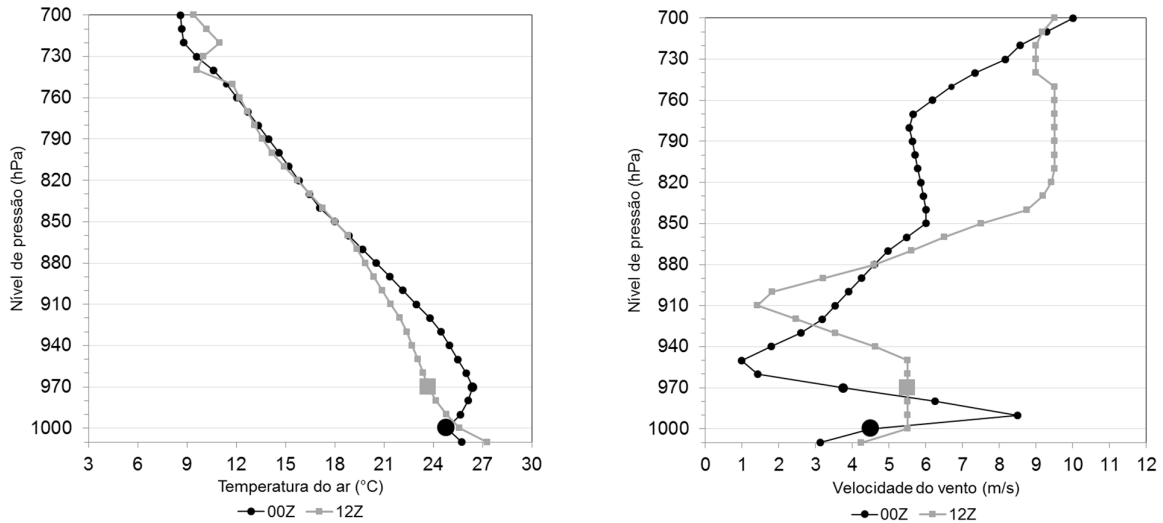
(b) Razão de mistura



(c) Pressão diferencial de saturação

Figura 3 – Perfil vertical obtido de sondagem de ar superior realizada pela estação SBBE em 11 de agosto de 2022 às 00Z e 12Z. (a) perfil vertical da temperatura potencial e potencial virtual, (b) perfil vertical da razão de mistura e (c) perfil vertical da pressão diferencial de saturação. Os pontos em destaque da curva indicam o topo da camada limite atmosférica.

No perfil vertical de temperatura do ar de 00Z foi verificada uma camada de inversão térmica, ou seja, a temperatura do ar aumentou com a altura, imediatamente acima da CLA identificada através dos perfis de Θ , Θ_v e PDS, situação típica de uma camada estável. Às 12Z não foi mais verificada a camada de inversão térmica, o que favoreceu a dispersão de poluentes ao longo da manhã (figura 4a). O perfil vertical da velocidade do vento, mostrou menores valores dentro da CLA às 00Z (na superfície com apenas 3,0 m/s) e logo acima do topo com um aumento brusco de 4,5 m/s para 8,5 m/s, enquanto que às 12Z a velocidade do vento se manteve aproximadamente constante dentro da CLA até 950 hPa (com valor de aproximadamente 5,5 m/s), conforme pode ser visto na figura 4b.



(a) Perfil vertical da temperatura do ar

(b) Perfil vertical da velocidade do vento

Figura 4 – Perfil vertical obtido de sondagem de ar superior realizada pela estação SBBE em 11 de agosto de 2022 às 00Z e 12Z. (a) perfil vertical da temperatura do ar, (b) perfil vertical da velocidade do vento. Os pontos em destaque da curva indicam o topo da camada limite atmosférica.

4. Conclusão

Através dos perfis verticais da temperatura potencial e potencial virtual, razão de mistura e de PDS foi possível identificar que a CLA estava rasa em Belém-PA no dia 11 de agosto de 2022, com topo no nível de 1000 hPa (113 m) às 00Z e de 970 hPa (391 m) às 12Z. Além disso, a CLA estava com características peculiares de uma atmosfera estável, sobretudo no horário noturno, quando apresentou uma camada de inversão térmica, que atuou como uma espécie de tampa, confinando os poluentes próximo da atmosfera, uma vez que impede a circulação atmosférica vertical, já que o ar mais frio não pode ascender através do ar quente de inversão, o que justificou o acúmulo da fumaça próximo da superfície nas primeiras horas do dia 11. Embora a CLA no horário das 09 horas, ainda estivesse rasa, a atmosfera já apresentava características do aquecimento diurno, sem inversão térmica no perfil vertical, o que favoreceu a dispersão da fumaça no decorrer da manhã.

Referências Bibliográficas

BETTS, A. K.; ALBRECHT, B. A. Conserved variable analysis of the convective boundary layer thermodynamic structure over the Tropical Oceans. **Journal Atmospheric Sciences**. v. 44, p. 83-99, 1987.

BETTS, A. K. et al. Surface diurnal cycle and boundary layer season. **Journal of Geophysical**

Research. v. 107, p. 10.1029/2001JD000356, 2002.

BETTS, A. K.; FISCH, G.; von RANDOW, C.; SILVA DIAS, M. A. F.; COHEN, J. C. P.; SILVA, R.; FITZJARRALD, D. R. The Amazonian Boundary Layer and Mesoscale Circulations. **Geophysical Monograph Series**, AGU, 2009.

BOLTON, D. The computation of equivalent potential temperature. **Monthly Weather Review**. v.108, p. 1046 – 1053, 1980.

CARVALHO, W.F.; BERARDO, J. L.; ASSIS, J. P.; GUEDES, R. L.; ARAI, N. **Dispersão de poluentes na cidade de São José dos Campos**, p. 1-6, 2013. Disponível em: < http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/cptec.inpe.br/walmeida/2004/06.14.10.03/doc/Carvalho_Dispersao%20dos%20poluentes%20na%20cidade%20de%20Sao%20Jose%20dos%20Campos.pdf>. Acesso em: 30 ago 2022.

CARVALHO, V. S. B.; FREITAS, E. D.; MAZZOLI, C. R. R.; ANDRADE, M. F. Avaliação da influência de condições meteorológicas na ocorrência e manutenção de um episódio prolongado com altas concentrações de ozônio sobre a Região Metropolitana de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, p. 458-469, 2012.

CRAWFORD, J.; CHAMBERS, S. D.; COHEN, D. D.; WILLIAMS, A. G.; GRIFFITHS, A. D.; STELCER, E. Assessing the impact of atmospheric stability on locally and remotely sourced aerosols at Richmond, Australia, using Radon-222. **Atmospheric Environment**, v. 127, p. 107–117, 2015.

GLOBOPLAY. **Vídeo Bom dia Pará**: Moradores reclamam de fumaça na região metropolitana de Belém na manhã desta quinta (11), 2022. Disponível em: <<https://globoplay.globo.com/v/10839234/>>. Acesso em: 22 ago 2022.

GARSTANG, M.; FITZJARRALD, D. R. **Observations of surface to atmosphere interactions in the tropics**. New York: Oxford-University-Press, 1999. 405 p.

JANJAI, S.; BUNTOUNG S.; NUNEZ M.; CHIWPREECHA K.; PATTARAPANITICHAI S. Meteorological factors affecting lower tropospheric ozone mixing ratios in Bangkok, Thailand. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 147, p. 76-89, 2016.

PANOFSKY, H. A.; DUTTON, J. A. **Atmospheric Turbulence: Models and Methods for Engineering Applications**, John Wiley & Sons, New York, 1984. 397 p. SANTOS, R. M. N., **Estudos da Camada Limite Noturna na Amazônia**. 2005.168 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Madison –wi: Kluwer Academic Publisher, 1988. 540 p.

WANG, F.; CHAMBERS, S. D.; ZHANG, Z.; WILLIAMS, A. G.; DENG, X.; ZHANG, H.; LONATI, G.; CRAWFORD, J.; GRIFFITHS, A. D.; IANNIELLO, A.; ALLEGRINI, I. Quantifying stability influences on air pollution in Lanzhou, China, using a radon-based “stability monitor”: Seasonality and extreme events. **Atmospheric Environment**, v. 145, p. 376–391, 2016.

ZHANG, Z.; WANG, F.; COSTABILE, F.; ALLEGRINI, I.; LIU, F.; HONG, W. Interpretation of ground-level ozone episodes with atmospheric stability index measurement. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 19, p. 3421-3429, 2012.