

## **Estudo de Camada Limite Planetária com o uso de um Lidar de Retroespalhamento em São Paulo, Brazil**

Caio Alencar de Matos<sup>1</sup>  
Ani Sobral Torres<sup>1</sup>  
Eduardo Landulfo<sup>1</sup>  
Walter Morinobu Nakaema<sup>1</sup>  
Sandro Toshio Uehara<sup>1</sup>  
Patricia Sawamura<sup>1</sup>  
Wellington de Jesus<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Universidade de São Paulo – IPEN/USP  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 , Cidade Universitária, São Paulo/SP

caioalencarmatos@hotmail.com  
anisobraltorres@hotmail.com  
elandulf@ipen.br  
walternak\_au@yahoo.com.au  
sandrotoshio@hotmail.com  
patricia\_sawamur@yahoo.com.br  
wcjesus@gmail.com

**Resumo.** Este trabalho apresenta um estudo da camada limite planetária (CLP) por um Lidar de retroespalhamento elástico operando na cidade de São Paulo, Brasil. Alguns métodos foram utilizados para se obter o valor da camada de mistura a partir do sinal Lidar e estes são discutidos assim como alguns resultados são apresentados. Entre estes métodos o que melhor se adequou foi o método do logaritmo, apresentando as menores variações.

**Abstract.** This work describes a study of the planetary boundary layer by a Backscattering Lidar operating in the city of São Paulo, Brazil. Some methods were used to obtain the mixing layer value from the Lidar signal and they are discussed as well some results presented. Between these methods the best was the logarithmic one, which presented the smaller variation of the mixed layer height.

**Palavras-chave:** remote sensing, LIDAR, aerossol, planetary boundary layer, mixed layer height.

## 1. Introdução

A Camada Limite Planetária (CLP) é a região mais próxima da superfície da Terra, sendo diretamente afetada por processos ou eventos que ocorrem na superfície, sendo a determinação de sua dinâmica e altura, de grande interesse para a meteorologia e ciências ambientais. Os fatores que alteram a camada limite são o aquecimento devido a energia solar, a absorção dessa energia pelo solo, a transpiração das plantas, ventos locais e outros eventos na superfície. A dinâmica do topo da camada limite é de grande importância para estudos de poluição e transporte de poluentes.

Nesta região muitas vezes acontecem eventos de inversão térmica, funcionando como uma “tampa” para o que está abaixo dela. No entanto, existe uma grande dificuldade de gerar um modelo da evolução da camada limite e existem inúmeros esforços presentes para tentar medir a sua altura, entre eles o sistema LIDAR que se tornou uma opção promissora para esta finalidade, Kovalev (2004).

A camada convectiva ou de mistura é uma subcamada de extrema importância dentro da camada limite, Stull(1988), sendo esta caracterizada por uma grande movimentação vertical das parcelas de ar. Nesta subcamada há também a ocorrência de inversões e muitos autores, Kovalev et al (2004), não diferenciam a camada limite da camada de mistura, pois no topo de seu crescimento, esta última ocupa a camada limite inteira, não existindo nenhuma distinção entre as duas neste momento. Porém neste trabalho esta será feita, pois um dos objetivos é justamente monitorar o crescimento da camada de mistura até ela se encontrar com a camada limite.

Um dos métodos utilizados por meteorologistas para estimar a altura da camada limite é a medição da temperatura potencial, e de perfis de umidade relativa, sendo que a partir destes perfis o ponto onde a temperatura potencial tem um aumento abrupto, ocorrendo na mesma altura uma diminuição da umidade relativa e é a altura da camada limite. É importante para os meteorologistas que utilizam modelos para a obtenção da camada de mistura, terem algum dado real mostrando essa variação, sendo que o Lidar possibilita tal medida.

## 2. Procedimento Experimental

O sistema LIDAR localizado em São Paulo é um sistema de retroespalhamento de um único comprimento de onda, apontando verticalmente ao zênite e operando no modo coaxial. A sua fonte é baseada em um laser comercial Nd: YAG ( Brilliant by Quantel AS), operando na frequência do segundo harmônico, com 532 nm, com uma taxa de repetição de 20 Hz. A potência média pode ser ajustada até um máximo de 3,3 W.

A divergência do pulso laser é abaixo de 0,5 mrad. É utilizado um telescópio com 30 cm de diâmetro (distância focal de 1,3 m) para coletar o espalhamento laser. O campo visual do telescópio é variável (0,5-5 mrad) utilizando um pequeno diafragma. O sistema LIDAR é utilizado com um campo visual fixo de cerca de 1 mrad, o que permite começar a captar sinal a partir de 300m metros acima do telescópio.

Um sistema Raman Lidar está em processo de implementação futura aonde será usado do terceiro harmônico do laser (355 nm) para medidas de aerossol e vapor d'água futuramente.

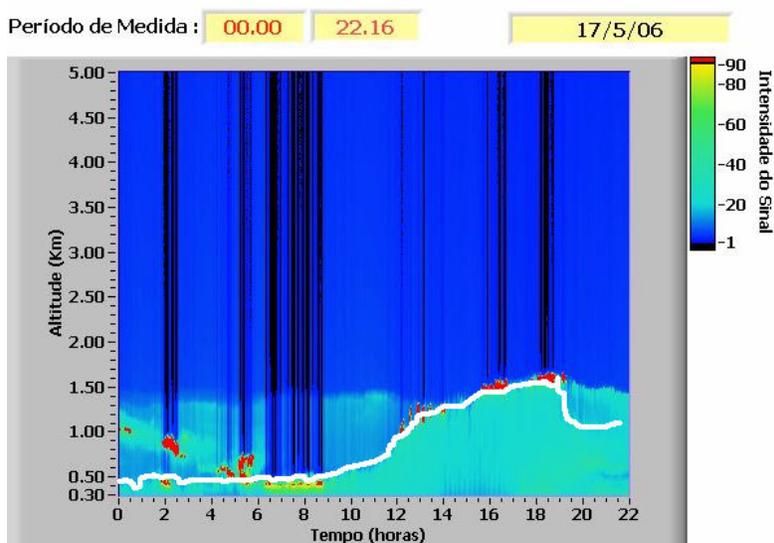
A radiação laser espalhada é enviada do telescópio para uma fotomultiplicadora acoplada a um filtro de interferência de banda estreita ( 1 nm de largura a meia altura), assegurando uma redução do sinal gerado pela luz solar e também outros ruídos, melhorando a relação sinal-ruído para altitudes maiores que 3km. Na saída da fotomultiplicadora têm-se um sinal duplo, sendo um analógico e outro no modo contador de fótons.

## 3. Metodologia

Cada dado coletado pelo sistema LIDAR é composto pela leitura de 2000 pulsos de laser, integrado durante cerca de 2 minutos. Cada dado tem 2000 canais correspondendo a uma resolução de 15 a 30 metros, por canal. Isto significa que se a resolução por exemplo é de 15m, o último canal teoricamente irá receber o sinal de uma altitude máxima de 30 km.

Para analisar os dados, primeiramente subtrai-se a radiação de fundo (BG – *background*) e depois faz-se uma correção pela distância entre o ponto da atmosfera e o receptor elevado ao quadrado ( $R^2$ ), devido à queda do campo eletromagnético nesta razão.

Feitas estas correções, e utilizando um aplicativo (Labview no nosso caso), os dados coletados são integrados, obtendo-se assim uma evolução temporal da camada limite, como é mostrado na **Figura 1**. Esta figura é referente ao dia 17/05/2006, e as medidas foram realizadas entre as 00:00h e as 22:16h. As cores indicam a intensidade do sinal conforme a escala à direita. A escala horizontal indica o tempo em horas e a vertical corresponde à altitude em quilômetros.



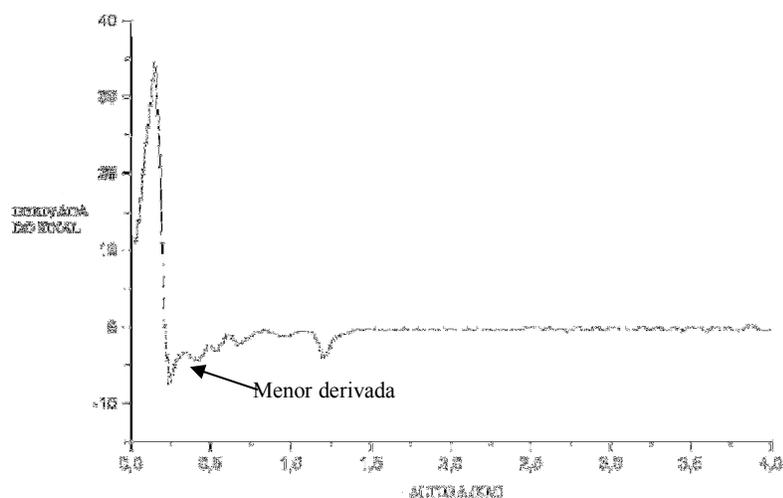
**Figura 1.** Evolução temporal da camada limite referente ao dia 17/05/2006, entre as 00:00h e 22:16h.

Para a determinação da camada de mistura foram testados alguns métodos. Entre estes estão o método visual, o método da derivada, o método do logaritmo, e o método da função idealizada, que ainda está em desenvolvimento.

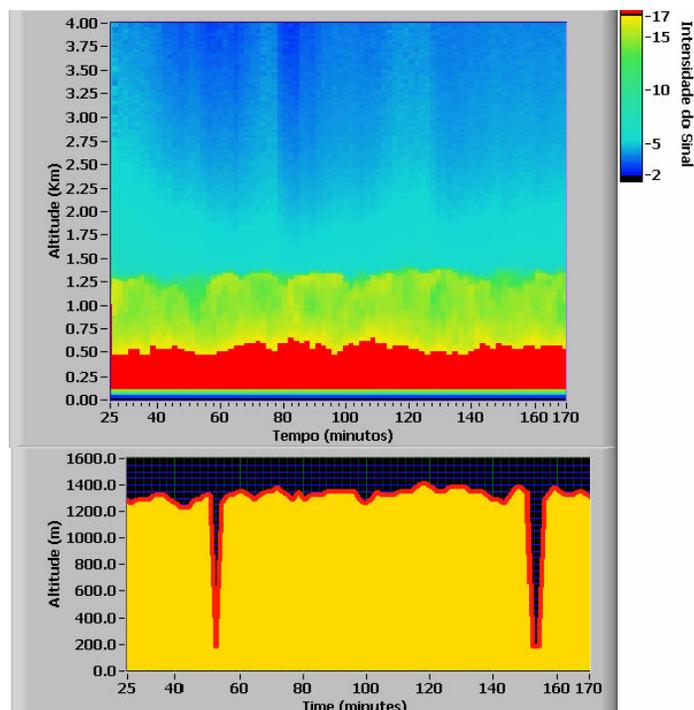
O primeiro deles consiste apenas em visualizar onde existe uma inversão de aerossol, ou seja, onde existe uma grande variação da concentração de aerossol, como exemplificado na **Figura 1**. Apesar de este método apresentar poucas falhas, ele não é um método rápido, necessitando a análise individual de cada dado, tornando-o ineficiente.

Métodos matemáticos foram testados para tentar obter um melhor e mais rápido resultado, já que com um método matemático pode-se criar um programa para a análise. O primeiro desses testes é o da derivada que consiste, após realizadas as devidas correções nos dados, calcular a derivada da intensidade do sinal. Em seguida plota-se um gráfico da derivada do sinal pela altitude, e o ponto cuja a derivada é menor será o ponto onde está localizada a camada de mistura. Na **Figura 2** esse gráfico é representado. Através dela, pode-se observar que a menor derivada está em aproximadamente 250 m, ou seja, a camada de mistura está em 250 m segundo este método. Utilizando o programa Labview foi possível

automatizar este método, exibindo-se a variação temporal da camada de mistura através do método da derivada (**Figura 3**).



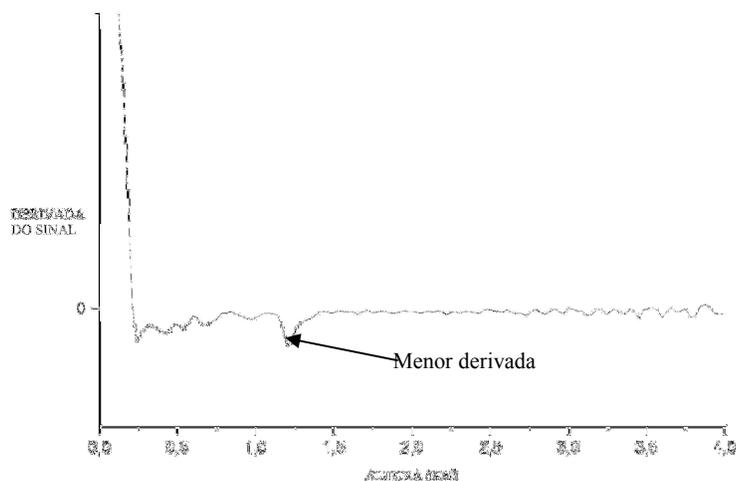
**Figura 2.** Gráfico da derivada do sinal pela altura referente ao dia 30/04/2004, coletado das 11:05h as 11:11h



**Figura 3.** Evolução temporal da camada limite com o método da derivada na rotina do Labview.

O método logaritmo consiste no cálculo do logaritmo do sinal, após todas as correções dos dados, e então o cálculo da derivada deste logaritmo. O ponto onde estiver a menor derivada será a localização da camada de mistura. A **Figura 4** referente ao dia 30/04/2004

coletado as 11:30h mostra o gráfico da derivada obtido por este método. Como pode-se observar o ponto de menor derivada está ao redor de 1250 metros. Foi feito para este método também um programa no Labview o qual possibilitou a visualização temporal da altura da camada de mistura.



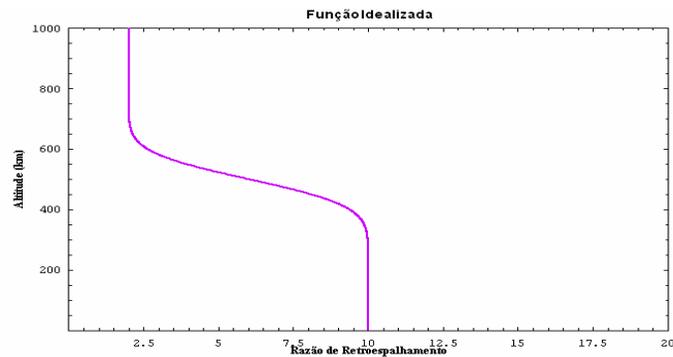
**Figura 4.** Gráfico da derivada do logaritmo do sinal pela altura, coletado das 11:05h as 11:11h do dia 30/04/2004.

O método da função idealizada desenvolvido por Steyn et al (1999), que mede a altura da camada de mistura e a espessura da zona de entranhamento, consiste em ajustar, a partir dos dados coletados, parâmetros de uma função idealizada, descrita pela **Equação 1**. Nesta,  $B(Z)$  é o perfil de retroespalhamento idealizado,  $B_m$  é a média do coeficiente de retroespalhamento da camada de mistura,  $B_u$  é a média do coeficiente de retroespalhamento imediatamente acima da camada de mistura,  $z_m$  é a altura da camada de mistura e  $z$  é altura,  $s$  é a espessura da camada de entranhamento, Kunkel et al (1977), Boers and Eloranta (1986), Cooper and Eichinger (1994). Para a geração do gráfico desta função foi utilizado o software Mathematica 5.0. A partir desse ajuste conseguimos parâmetros importantes como a altura da camada de mistura ( $z_m$ ).

$$B(Z) = \frac{B_m - B_u}{2} - \left( \frac{B_m - B_u}{2} \right) \operatorname{erf} \left( \frac{z - z_m}{s} \right) \quad \text{Eq. 1}$$

$$\operatorname{erf}(z_0, z_1) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{z_0}^{z_1} e^{-t^2} dt \quad \text{Eq. 2}$$

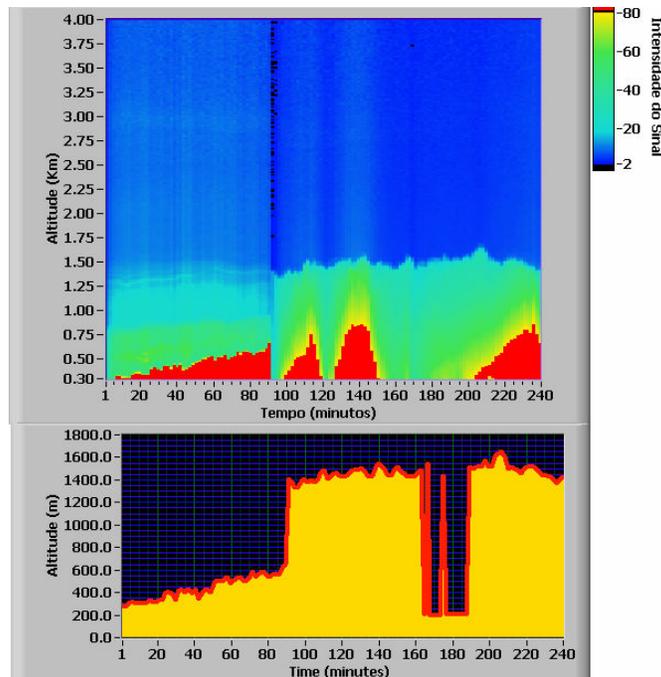
Esse método encontra-se em desenvolvimento e resultados serão publicados posteriormente. A **Figura 5** mostra a Equação 1 com parâmetros idealizados para efeito de teste. Os parâmetros utilizados foram  $B_u=2$ ,  $B_m=10$ ,  $z_m=500\text{m}$  e  $s=100\text{m}$ . Por este perfil pode-se claramente observar que a Camada de Mistura está em torno de 500 metros.



**Figura 5.** Teste do ajuste de uma função idealizada.

#### 4. Resultados

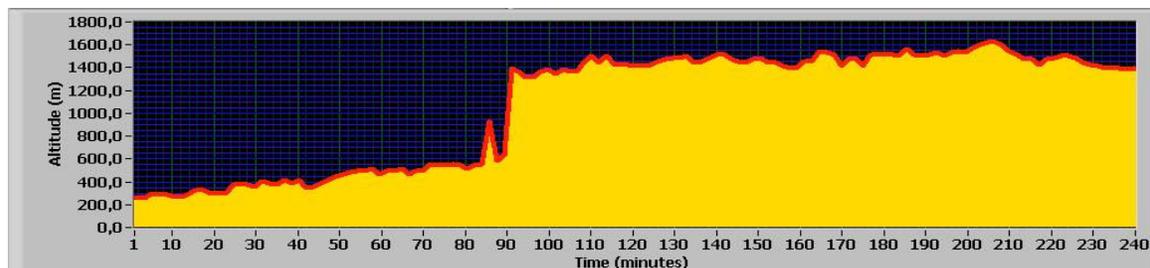
A seguir são apresentados resultados de um caso de estudo para os métodos de obtenção de camada de mistura testados. No gráfico superior da **Figura 6**, pelo método visual pode-se observar que a camada de mistura começa em torno de 300 metros e aumenta durante 90 minutos aproximadamente. Após esse horário a camada de mistura alcança o topo da camada limite que está entre 1300 e 1450 metros continuando assim até o final da medida. No gráfico inferior observamos esse mesmo crescimento porém agora pode-se observar a camada de mistura cresceu até 1400 metros. Observa-se que entre 160 a 190 minutos existe uma queda na altura da camada de mistura, possivelmente a jatos de ar ou mesmo a um erro do método empregado (método da derivada).



**Figura 6.** Gráfico referente ao dia 19/08/2004, tendo as suas medidas começadas às 09:17. O gráfico superior é a evolução temporal da camada de mistura e o inferior representa a altura da camada de mistura obtida pelo método da derivada.

Na **Figura 7** observa-se a altura da camada de mistura obtida pelo método do logaritmo. Comparando-se com o método da derivada (**Figura 6** inferior) podemos notar o

mesmo crescimento na altura da camada, contudo no intervalo entre 160 a 190 minutos não se observa a queda da altura observado no gráfico da derivada. Portanto, podemos dizer que nesse intervalo não existe a entrada de jatos de ar e sim, um erro do método da derivada.



**Figura 7.** Altura da camada de mistura obtida pelo método do logaritmo para o dia 19/08/2004 com medidas iniciadas às 09:17.

#### 4. Conclusão

Segundo as análises realizadas para obtenção da altura de camada de mistura a partir do sinal de retroespalhamento de aerossol do Lidar, podemos concluir que o método que melhor se adequou foi o método do logaritmo apresentando variações que condizem melhor com a realidade da altura da camada de mistura além de coincidir com o método visual. O método da função idealizada está em desenvolvimento, sendo o próximo objetivo de estudo comparativo da altura da camada de mistura a partir de dados obtidos com o Lidar de retroespalhamento elástico.

#### 5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e ao CAPES pelo apoio financeiro.

#### 6. Referências Bibliográficas

- Boers, R., and Eloranta, E.W. Lidar measurements of the Atmospheric entrainment Zone and the Potential Temperature Jump across the top of the Mixed Layer, **Boundary-Layer Meteorology**, 34, 357-375, 1986.
- Cooper, D.I., and Eichinger, W.E., Structure of the Atmosphere in an Urban Planetary Boundary Layer from Lidar and Radiosonde Observations, **J. Geoph. Res.**, 99, 22937-22948, 1994.
- Kovalev, A.V., Eichinger, W.E. **Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis methods**. New Jersey, John Wiley & Sons, 2004.
- Kunkel, K.E., Eloranta, E.W., Shipley, S.T. Lidar Observations of the Convective Boundary Layer, **J. Appl. Meteor.**, 16, 1306-1311, 1977.
- Landulfo, E. et al. Synergetic Measurements of Aerosols over São Paulo, Brazil using LIDAR, Sunphotometer and Satellite Data During the Dry Season, **Atmospheric Chemistry and Physics**, Vol. 3, 1523 –1539, 2003.
- Steyn, D.G., Baldi, M., Hoff, R.M. The Detection of Mixed Layer Depth and Entrainment Zone Thickness from Lidar Backscatter Profile, **J. Ocean. Atm. Tech.**, 16, 953-959, 1999.
- Stull, R.B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. 2<sup>nd</sup> edition, Boston, Kluwer Academic Publishers, 1991.