

Calibração dos Perfis de Vapor de Água Medidos com Lidar-Raman Através de Sondagens Operacionais do Aeroporto de Manaus Realizado a 30 km de Distância

Diego A. Gouveia^{*1}, Henrique M. J. Barbosa¹, P. Artaxo¹, T. Pauliquevis², D. K Adams³, R. M. N Santos³

¹Instituto de Física, USP, São Paulo-SP - [*diego.gouveia@usp.br](mailto:diego.gouveia@usp.br)

²Depto. De Ciências Exatas e da Terra, UNIFESP, Diadema, São Paulo-SP

³Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente, INPA/UEA, Manaus-AM

RESUMO: O aeroporto militar de Manaus fornece sondagens operacionais duas vezes por dia durante todo o ano. Neste trabalho, verificamos a possibilidade de calibrar o sistema Lidar-Raman do projeto AEROCLIMA situado a 30 km de distancia do aeroporto no site da EMBRAPA, aplicando um método que utiliza as sondagens operacionais para a calibração. Como resultado, encontramos o valor de 0,83(5) kg/kg

ABSTRACT: The military airport in Manaus provides operational soundings twice a day through the year. In this paper, we analyze the possibility of calibrate the AEROCLIMA's Raman-Lidar located 30 kilometers from the airport at the site of EMBRAPA, applying a method that uses the operational soundings for calibration. As a result, the found value of 0.83 (5) kg / kg

1. Introdução

1.1 Lidar-Raman

LIDAR (Light Detection And Ranging) é um sistema de sensoriamento remoto ativo baseado em laser. À medida que o pulso de radiação eletromagnética se propaga na atmosfera, parte dele será atenuado no caminho reduzindo a intensidade do sinal. Ao medir a intensidade da luz retro-espalhada em função do tempo estamos fazendo uma medida da quantidade de material espalhador em função da altura. A equação do lidar, que dá a intensidade do sinal detectado da altura z , pode ser escrita de maneira simplificada como:

$$P(z, \lambda) = P_0 \frac{c\Delta T}{2} A_{tel} \eta_{eff}(\lambda) \frac{O(z)}{z^2} \beta(z, \lambda) \exp \left[-2 \int_0^z \alpha(z', \lambda) dz' \right]$$

onde a potência inicial do pulso, P_0 , e seu comprimento, $c\Delta t/2$, determinam a intensidade inicial do feixe e o termo exponencial representa a atenuação deste pulso no caminho até a altitude z . Uma fração $\beta(z, \lambda)$ do sinal cruzando a altitude z será retro espalhada e poderá ser detectada por um telescópio de área A_{tel} e eficiência quântica $\eta_{eff}(\lambda)$. No caminho de retorno, o sinal também será atenuado, por isto o fator 2 na exponencial, mas também haverá dispersão e por isto o fator z^{-2} . O termo $O(z)$ e um fator geométrico que dá a sobreposição entre o feixe de laser e o campo de visão do telescópio

No Lidar-Raman do projeto AEROCLIMA, medimos o sinal de retorno em 3 comprimentos de onda diferentes: o espalhamento elástico em 355 nm, e os espalhamentos inelásticos em 387 nm,

devido à seção de choque raman do N₂, e 408 nm, devido à seção de choque raman do H₂O (para uma descrição mais completa, veja [1]). Neste caso, a equação do lidar-raman é dada por:

$$P(z, \lambda) = P_0 \frac{c\Delta T}{2} A_{tel} \eta_{eff}(\lambda') \frac{O(z)}{z^2} \beta(z, \lambda, \lambda') \exp \left[\int_0^z (\alpha(z', \lambda) + \alpha(z', \lambda')) dz' \right] \quad (1)$$

onde o coeficiente de retro-espalhamento é escrito como $\beta(z, \lambda, \lambda')$ para incluir o espalhamento de comprimentos de onda λ em λ' , e atenuação é calculada de maneira diferente na subida $\alpha(z', \lambda)$ e na descida $\alpha(z', \lambda')$.

1.2 Medida de Vapor de Água com Lidar-Raman

Como a concentração de N₂ é constante, pode-se medir a concentração de H₂O na atmosfera tomando a razão entre o sinal nestes dois canais [8], o que elimina fatores pouco conhecidos como o fator geométrico de sobreposição. Esta é uma técnica bem estabelecida [6] e consegue-se observar o conteúdo de vapor de água desde próximo ao chão até a alta troposfera com boa resolução vertical e temporal.

A partir da equação (1) para $\lambda' = 408$ nm e $\lambda = 387$ nm, obtemos que a razão entre os dois sinais é dada por:

$$\frac{S_{H_2O} - BG_{H_2O}}{S_{N_2} - BG_{N_2}} = C''' \frac{\sigma_{H_2O}}{\sigma_{N_2}} \frac{w_{H_2O}}{w_{N_2}} \frac{T_{H_2O}^A}{T_{N_2}^A} \frac{T_{H_2O}^M}{T_{N_2}^M}$$

onde a constante adimensional C''' depende apenas dos fatores relacionados à instrumentação, e.g., componentes ópticos e fotomultiplicadoras, e só deve variar com o envelhecimento dos componentes, ou se algo for alterado na configuração, e.g. colocação de filtros ou variação da tensão nas PMTs. σ_{H_2O} e σ_{N_2} são as seções de choque de espalhamento raman; w_{H_2O} e w_{N_2} são as razões de mistura; $T_{H_2O}^A$ e $T_{N_2}^A$ são os coeficientes de transmissão devido aos aerossóis; e $T_{H_2O}^M$ e $T_{N_2}^M$ devido ao espalhamento molecular. O ruído de fundo, BG , precisa ser descontado do sinal S registrado em cada canal, sendo estimado a partir do sinal do espectro, ie, acima de 30 km.

Esta equação pode ser simplificada para a seguinte forma:

$$w_{H_2O} = C'' \Gamma_A \Gamma_M \frac{\overline{S_{H_2O} - BG_{H_2O}}}{\overline{S_{N_2} - BG_{N_2}}}$$

onde a constante C'' (g/kg) inclui além do termo C''' , a razão de mistura do N₂ e as seções de choque; e Γ_A e Γ_M são razão entre os coeficientes de transmissão para N₂ e H₂O. As barras indicam uma média temporal e espacial para se obter uma razão sinal ruído adequada [4].

Há diferentes abordagens na literatura para tratar a equação acima. Alguns autores estimam o coeficiente de transmissão Rayleigh (molecular) a partir do perfil de densidade obtido pela radiossonda para excluí-lo da constante de calibração [5],

$$w_{lidar} = C' Sinal', \text{ onde } Sinal' = \Gamma_M \frac{\overline{S_{H_2O} - BG_{H_2O}}}{\overline{S_{N_2} - BG_{N_2}}}, \text{ e } C' = C'' \Gamma_A$$

enquanto outros incluem tanto o coeficiente Rayleigh quanto mie (aerossóis) na constante de calibração [3], assim

$$w_{lidar} = C Sinal, \text{ onde } Sinal = \frac{\overline{S_{H_2O} - BG_{H_2O}}}{\overline{S_{N_2} - BG_{N_2}}} \text{ e } C = C'' \Gamma_A \Gamma_M \quad (2)$$

Neste trabalho, utilizamos a segunda metodologia para a calibração do sistema Lidar-Raman do projeto AEROCLIMA para medida de vapor de água, utilizando as radiosondagens operacionais que são realizadas diariamente no aeroporto militar de Manaus, que fica aproximadamente 30km de distancia do site da Embrapa onde se encontra o lidar. Assim, pudemos realizar a calibração desde fevereiro de 2011 a janeiro de 2012.

1.3 Constante de Calibração

Os dados da radiosondagens fornecem medidas in situ da razão de mistura do vapor de agua. A constante de calibração (ver eq. 2) é obtida através de um ajuste linear entre *Sinal* e o perfil de razão de mistura da sondagem, $w_{H_2O}^{sounding}$. Ela pode ser determinada com precisão de 2 a 6% [7] sendo que 3% desta incerteza são devido à variação da constante para diferentes sondagens.

O processo de calibração pode ser dividido em 3 passos:

1. O primeiro é fazer uma média temporal dos perfis obtidos com o lidar, sendo geralmente utilizado entre 5 a 100 min. Deve-se tomar cuidado na escolha do intervalo de integração pois um tempo muito curto poderia não resultar em uma boa razão sinal ruído, e um tempo muito longo poderia suavizar variações reais no perfil de vapor de água.

2. O segundo é interpolar os dados de alta resolução do perfil vertical do lidar para os níveis da sondagem.

3. Por fim, é feita a regressão linear entre $w_{H_2O}^{sounding}$ e *Sinal*, usando o método dos mínimos quadrados, para obter C e ΔC .

Encontra-se uma constante para cada sondagem e, para efeito de calcular o perfil de vapor a partir dos dados do lidar, utiliza-se o valor médio da constante e o erro na média.

2. Procedimento e Resultados Experimentais.

Para a calibração, utilizamos sondagens operacionais realizadas desde fevereiro de 2011 a janeiro de 2012 no aeroporto militar de Manaus. Excluindo-se os dias em que o lidar não coletou dados e aqueles quando não foi realizada a sondagem das 00UTC restaram 68 dias, e portanto 68 constantes de calibração foram calculadas.

O aeroporto miliar de Manaus fica a 30 km de distancia do campus da Embrapa, onde está instalado o lidar-raman. Assim, os dados da razão de mistura do vapor de agua pelas sondagens operacionais do aeroporto se referem a um perfil vertical que fica distante de aproximadamente 30 km do local onde os dados do Lidar foram coletados. Mesmo com esta distancia, acreditamos que a floresta amazônica conserve uma homogeneidade do ar nas regiões adjacentes, viabilizando a utilização destas sondagens. A validade desta hipótese está sendo investigada e maiores detalhes podem ser encontrados em [2].

Para obter uma boa razão sinal-ruído, fizemos uma media temporal de apenas 5 min do Sinal do lidar. Com esta pequena média temporal, conseguimos conservar pequenas variações no perfil vertical de vapor de agua. Após isto, fizemos uma interpolação linear nos perfil vertical de alta resolução do lidar para os níveis da sondagem entre 1km e 5km de altitude, onde temos maior confiança na correlação entre os dados da sondagem a do lidar. Com isto, pudemos determinar a

constante de calibração da equação 2 por um fit linear, para cada uma das sondagens. Com as constantes de calibração em mãos, plotamos os perfis verticais de vapor de água obtidos pela sondagem e pelo lidar calibrado. Três exemplos dos gráficos da calibração utilizando as sondagens operacionais do aeroporto militar e os perfis são mostrados na figura 1.

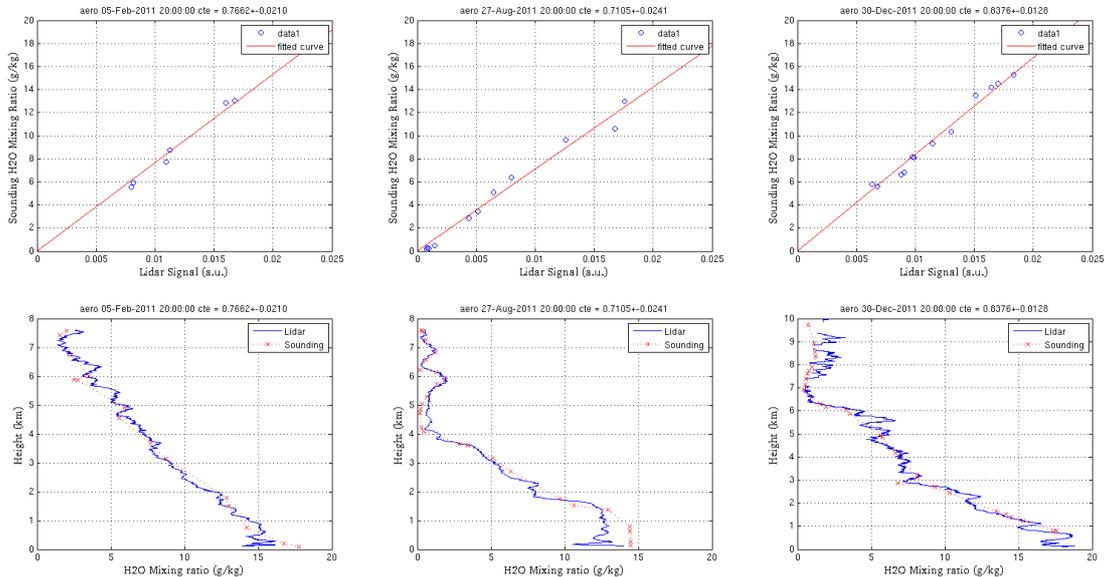


Figura 1: Ajustes lineares entre o *Sinal* do lidar e os dados de razão de mistura das sondagens operacionais do aeroporto miliar de Manaus dos dias 5 de fevereiro, 27 de agosto e 30 de dezembro de 2011, para obtenção da constante de calibração da equação 2 e os respectivos gráfico dos perfis verticais de vapor de água obtidos pela sondagem e do sistema lidar-raman calibrados.

Observamos nos gráficos que os perfis verticais para o vapor de água obtidos com as sondagens e com o sinal calibrado do lidar (w_{lidar}) seguem a mesma tendência entre si. Ao todo, foram utilizadas 68 sondagens operacionais do aeroporto para a obtenção das constantes de calibração, com resultados semelhantes aos apresentados na figura 1. A figura 2 mostra o histograma da distribuição das 68 constantes de calibração obtidas neste trabalho e um gráfico com os valores das constantes calibradas ao longo do ano para cada dia com dados disponíveis do lidar-raman e das radiosondagens operacionais.

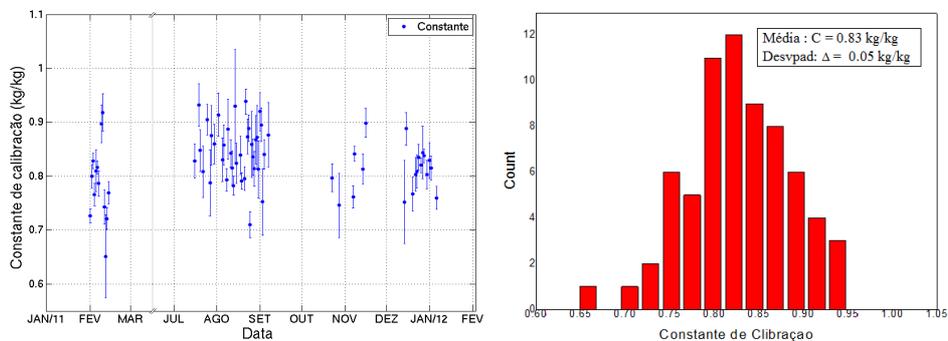


Figura 2: O gráfico mostra a os valores das constantes obtidas em cada dia que foi possível a calibração e ao lado o histograma com as 68 constantes de calibração obtidas com os dados das sondagens operacionais do aeroporto militar de Manaus, com a média entre as constantes e o desvio padrão da media.

Na figura 2, temos o gráfico dos valores das constantes obtidas em cada dia através do ajuste linear e sua barra de erros do ajuste. Essas barras de erro têm em média o valor de 0,034kg/kg e desvio padrão de 0,017kg/kg e associado principalmente à incerteza nas sondagens; no método utilizado descrito na seção 1.2, que faz uma simplificação em relação a influencia dos aerossóis; e ao ajuste em si, pois devido a pouca resolução vertical do sondagem operacional, o numero de graus de liberdade do ajuste fica reduzido. O histograma da figura 2 contem as 68 constantes de calibração, e como resultado final, obtivemos uma média ponderada pelo peso estatístico de cada constante de $\bar{C}=0,825(4)\text{kg/kg}$ e desvio padrão das constantes de $\Delta=0,05\text{kg/kg}$. Este foi um bom resultado, com incerteza em torno de 7% para a constante de calibração, a pesar das radiosondagens possuírem pouca resolução espacial e serem realizadas a 30 km de distância. Devido à precisão das calibrações realizadas a cada dia, não podemos identificar nenhuma tendência de variação das constantes ao longo do ano, como vemos no gráfico da figura 2.

3. Conclusões

O aeroporto de Manaus fornece sondagens durante o ano todo. Neste trabalho, conseguimos calibrar o sistema lidar-Raman através desse método simples encontrando o valor para a constante de 0,83 kg/kg com incerteza estimada em 7%, apesar de serem realizadas a 30 km de distância. Devido a pouca resolução espacial das sondagens, não conseguimos identificar claramente uma tendência nos valores das constantes de calibração em cada época do ano, como vemos na figura 2.

4. Referências

- [1] Barbosa, et al., 2011: Continuous Measurements of Aerosols and Water Vapor in the Amazon. VI Workshop Lidar Measurements in Latin America, La Paz, 2011
- [2] Barbosa, et al., 2012: Intercomparison of water vapor calibration constants derived from in-situ and distant soundings for a Raman-Lidar operating in the Amazon Forest. 26 International Laser Radar Conference, Athens, Greece.
- [3] Bosser, P. et al., 2010: A case study of using raman lidar measurements in high-accuracy gps applications. *J. Geod.*, 84, 251-265, doi:10.1007/s00190-009-0362-x.
- [4] Bosser, P., O. Bock, C. Thom, and J. Pelon, 2007: Study of the statistics of water vapor mixing ratio determined from raman lidar measurements. *Appl Opt*, **46** (23), 8170-8180, doi:10.1364/AO.46.008170.
- [5] Dionisi, D., F. C. G. L. Liberti, and F. Cardillo, 2010: Calibration of a multichannel water vapor raman lidar through noncollocated operational soundings: Optimization and characterization of accuracy and variability. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 27, 108-121.
- [6] Melfi, S. H., 1972: Remote measurements of the atmosphere using raman scattering. *Appl. Opt.*, 11, 1288-1292.
- [7] Revercomb, H. et al., 2003: The arm program's water vapor intensive observation periods. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 84 (2), 217-236, doi:10.1175/BAMS-84-2-217.
- [8] Whiteman, D., S. Melfi, and R. Ferrare, 1992: Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the earth's atmosphere. *Appl Opt*, **31** (16), 3068-3082.