

INICIAÇÃO CIENTÍFICA, RELATÓRIO FINAL

Período: 17/03/2020 a 10/01/2021 (10 meses)

Título do Projeto: Estabilidade da calibração de um Lidar Raman para medidas de vapor de água na Amazônia

Instituição: Universidade de São Paulo

Endereço: Rua do Matão, 1371, São Paulo-SP 05508-090

Orientador: Henrique M. J. Barbosa +55 (11) 3091-8985
hbarbosa@if.usp.br

Aluno: Guido Giovanelli Haytzmann (n° usp 10787230)
guidohay@hotmail.com

Processo: 2019/04455-9

1. Resumo do Projeto	2
2. Objetivos	2
Novo Objetivo	2
3. Realizações no período do relatório	3
4. Discussões e conclusão	11
5. Atividades complementares	12
6. Cronograma	12
7. Referências	13

Orientador:

Prof. Henrique M. J. Barbosa
Instituto de Física
Universidade de São Paulo

Henrique M. J. Barbosa

Aluno:

Guido G. Haytzmann

1. Resumo do Projeto

O ciclo hidrológico é um componente fundamental do sistema climático. Efeito estufa, balanço energético terrestre, convecção rasa e profunda, geração de energia termodinâmica da parcela, todos estes são fenômenos que para serem compreendidos, exigem uma ampla observação e análise da quantidade de vapor de água presente na atmosfera. Apesar da importância dos trópicos na regulação do ciclo hidrológico global, eram raras as medidas atmosféricas com alta resolução temporal e espacial nesta região. Isto mudou com alguns programas ou campanhas de medidas foram implementados na Amazônia na última década, como GoAmazon2014/15 e ACONVEX (Aerosols, Clouds, Convection Experiment). Neste projeto de iniciação científica o bolsista irá estudar a técnica lidar e utilizar os dados do Lidar-Raman do sítio ACONVEX, que é capaz de medir perfis verticais de aerossóis e vapor de água em até 12 km de altura. Será implementado um algoritmo de calibração para o canal de vapor de água, utilizando dados de sondagem realizada pelo aeroporto militar de Manaus (AM). O objetivo principal será processar pelo menos 2 meses de dados (um na estação seca, e outro na chuvosa), de cada um dos anos disponíveis na base de dados do lidar (2011-2018) e analisar a estabilidade da constante de calibração nas diferentes estações e anos.

2. Objetivos

O principal objetivo deste projeto de iniciação científica foi realizar a calibração do canal de vapor de água do lidar raman, que operou no sítio experimental ACONVEX, próximo a Manaus, na região da Amazônia central, entre 2011 e 2018. O segundo objetivo principal foi verificar se a calibração muda em diferentes estações do ano, ou com diferentes concentrações de aerossol.

Os seguintes objetivos deverão ser alcançados ao longo deste projeto:

- Continuar os estudos de introdução a física atmosférica (iniciação científica sem bolsa iniciada em out/2018) e cursar a disciplina de Meteorologia Física I no IAG-USP;
- Aprender a programar em linguagem Matlab ou Python e a trabalhar com o formato de dados científicos utilizado na base de dados do Lidar, e na base de dados de radiossondagens;
- Implementar o algoritmo de calibração do canal de vapor de água do lidar-raman
- Processar pelo menos 2 meses de dados (um na estação seca, e outro na chuvosa), de cada um dos anos disponíveis na base de dados do lidar (2011-2018);
- Analisar a estabilidade da constante de calibração em diferentes situações.

Novo Objetivo

O objetivo da renovação por 9 meses (maio a dezembro) é realizar a calibração do Lidar Raman utilizando a medida de PWV da estação GNSS instalada do mesmo sítio experimental (Embrapa, Manaus-AM), entre 2011 e 2012. O aluno irá comparar com a calibração já realizada com as sondagens no mesmo período.

Este trabalho será particularmente importante para as medidas que o Laboratório de Física Atmosférica (LFA) do IF-USP irá realizar a partir de Abril/2020 no Torre ATTO. O

sistema Lidar Raman UV será instalado junto com uma antena GNSS, e diversos instrumentos para medir a distribuição vertical de nuvens e aerossóis. O objetivo do LFA será investigar a interação entre aerossóis e nuvens. A metodologia de calibração que será implementada nesta iniciação científica, será posteriormente utilizada para processar as medidas (fora do contexto desta iniciação).

3. Realizações no período do relatório

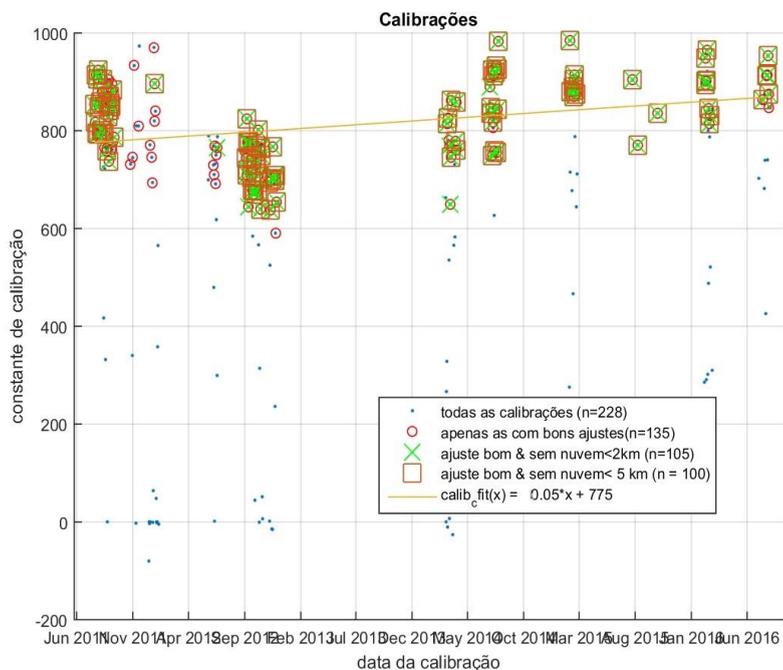
Após o último relatório (fevereiro de 2020 a janeiro de 2020), o bolsista realizou melhorias no algoritmo de calibração com a radiossonda e terminou de processar as calibrações dos anos remanescentes (2013 a 2016), finalizando assim, todos os compromissos anteriores à renovação da bolsa. Posteriormente foi implementado um novo algoritmo, dessa vez com intuito de calibrar os dados do lidar utilizando as medidas de PWV da estação GNSS. Por fim, o aluno comparou os resultados das calibrações com radiossonda e com a estação GNSS.

3.1 Melhorias no algoritmo de calibração da radiossonda

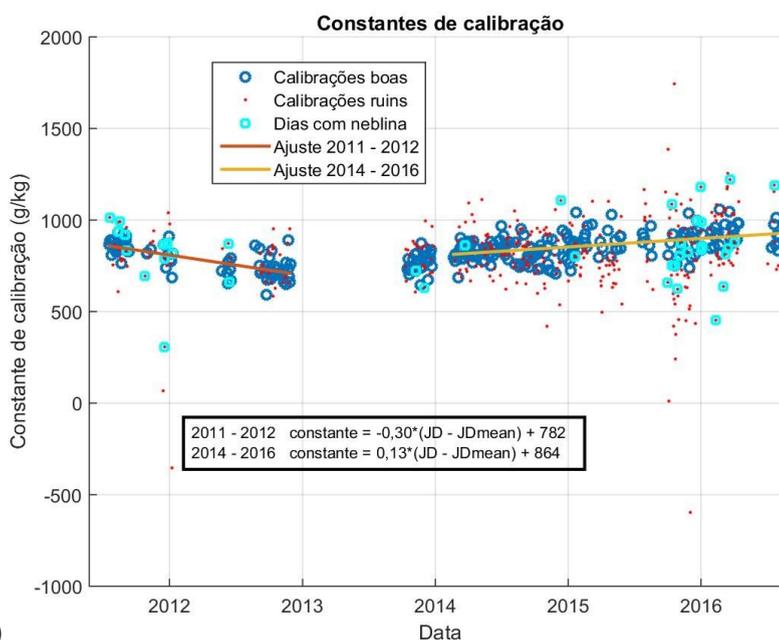
Inicialmente, o aluno processou todos os dados dos anos que restavam para terminar a primeira parte desta iniciação científica (2013 a 2016). Foram feitas figuras de todas as etapas da calibração, iniciando com a imagem do lidar no período de interesse, até a comparação do perfil calibrado com o perfil da sondagem. Com isso, percebeu-se um "bug" no algoritmo de calibração. Estávamos fazendo a média de uma hora dos dados do lidar a partir do momento do lançamento da radiossonda, quando deveríamos tomar meia hora antes até meia hora depois. Este erro foi consertado e todos os dados foram reprocessados. Vale ressaltar aqui que estava previsto o processamento de apenas dois meses de dados para cada ano, mas processamos todos os dias disponíveis.

A segunda modificação no algoritmo veio com a análise da série temporal das constantes de calibração. Notou-se que havia uma variação muito grande nos seus valores, devido ao cálculo do vapor de água como a razão entre os sinais de vapor de água e nitrogênio. No limite em que os dois sinais iam para zero, muitas vezes eram obtidos dados negativos (devido à retirada do ruído de fundo), ou até valores muito grandes (quando se dividia por um valor muito próximo de zero).

Para resolver esse problema, modificamos o algoritmo. Antes de fazer a divisão entre os sinais, o código agora verifica se ambos os sinais são pelo menos 10 vezes maior que o desvio padrão do ruído de fundo de ambos ($S/N > 10$). Após essa modificação, todos os dados de 2011 até meados de 2016 foram reprocessados. Verificou-se que foi possível evitar os problemas que ocorriam antes e obteve-se uma série temporal da constante de calibração com uma variação menor, conforme indica a figura 1b. Nota-se, por exemplo, que o grande número de constantes cujo valor estava entre -200 e 600 g/kg (fig. 1a, pontos azuis pequenos) não aparecem na figura 1b. Restam apenas algumas poucas constantes com estes valores incorretos, todas as quais foram calculadas em dias de neblina, ou com nuvens abaixo de 2 km, fator que atenua fortemente os dados do lidar, tornando assim a calibração muito imprecisa.



(a)



(b)

Figura 1: Série temporal da constante de calibração [g/kg] obtida a partir do (a) código antigo (b) código novo com as correções implantadas neste período de atividades. Os ajustes lineares foram feitos em cada período separadamente, e a coordenada independente é o dia juliano (JD) menos o dia juliano médio do período (JDmed).

Além disso, a figura 1b contempla uma outra modificação no algoritmo. Anteriormente, as calibrações foram consideradas incorretas por terem sido realizadas na presença de nuvens (inspeção visual) ou porque o ajuste linear entre a sondagem e o lidar não foi adequado (inspeção visual). No período deste relatório, passamos a aplicar critérios estatísticos para determinar a qualidade da calibração. As calibrações consideradas boas são aquelas com:

- Incerteza do coeficiente angular menor que 20% de seu valor absoluto
- Coeficiente linear compatível com zero dentro de uma incertezas, e
- Coeficiente de determinação maior que 0,8.

Com esses critérios, todos os casos de nuvens baixas foram automaticamente identificados como dias ruins para a calibração. Contudo, foi necessário ainda excluir dias com neblina. Na Amazônia, com ~ 20 g/kg de vapor de água na superfície, é muito comum a formação de neblina à noite, às vezes já a partir 20h. A neblina ocorre abaixo de 200 m, na região onde o lidar ainda tem overlap nulo, ou seja, o telescópio não enxerga o feixe laser. O sinal detectado nestas altitudes deve-se, portanto, a espalhamento múltiplo. A presença de neblina aumenta consideravelmente este sinal. Assim, o novo código verifica qual o valor máximo que o sinal do Lidar assume até 250 m de altura e depois verifica o valor máximo até 3 km, se a fração $MAX3000 / MAX250$ for menor ou igual a 1, então consideramos que nesse dia havia neblina.

Como os dados do lidar são fortemente atenuados por neblina/nuvens, esses dias não servem para fazer as calibrações e são descartados, assim como aqueles com calibração ruim, na hora de fazer os dois ajustes lineares da figura 1b. Foram feitos dois ajustes, pois o laser foi trocado em 2013 e não faria sentido analisar os dados igualmente. O primeiro ajuste possui uma tendência de diminuição nos valores das constantes, e seu coeficiente angular não é compatível com 0 (intervalo de confiança de 95% [-0.36, 0.23]). Já o segundo ajuste, mostra uma tendência de aumento nos valores das constantes, e seu coeficiente angular também não é compatível com 0 (intervalo de confiança de 95% [0.09, 0.16]). O fato dos dois ajustes indicarem uma tendência de variação temporal nos valores das constantes, pode se dar tanto pela degradação do sistema quanto por ajustes no mesmo. Isso mostra que é necessário a contínua calibração do sistema lidar, pelo menos algumas vezes por mês.

Além disso, fica claro que mesmo nos dias considerados bons há uma grande variação nos valores das constantes (RMSE de 55 g/kg e 63 g/kg respectivamente), ainda que dentro de um pequeno intervalo de tempo, devido a fatores que não pudemos identificar com segurança (estabilidade da atmosfera, ruído do sinal, diferenças entre o perfil vertical de vapor de água na Embrapa e em Ponta Pelada, etc.). Isso determina a incerteza na obtenção da razão de mistura de vapor de água a partir dos dados do lidar em, dada aproximadamente por 55 g/kg / 781 g/kg ~ 6.9 % para o primeiro período (63 g/kg / 864 g/kg ~ 7.3 % para o segundo período).

3.2 Implementação do algoritmo de calibração utilizando as medidas de PWV

O novo algoritmo de calibração foi baseado no código anterior. No início ele verifica se existem os dados do lidar, da radiossonda e do GNSS na data desejada. Se existem, ele faz todo o processo para calibrar os dados com a radiossonda (explicado no último relatório) e discutido na seção anterior, e em seguida calibra com o PWV do GNSS.

O PWV (do inglês *precipitable water vapor*) é a massa de vapor de água (precipitável) integrada na coluna, sendo medida em mm, ou seja, kg/m². Formalmente, se temos um perfil de razão de mistura de vapor de água, $w(z)$, e da densidade do ar seco, ρ , o PWV é calculado como:

$$PWV = \int_0^{topo} \rho(z)w(z)dz \quad (1)$$

Para calcular este valor a partir do lidar foi necessário, inicialmente, obter dados de pressão atmosférica em todos os níveis de dados do lidar. Como tínhamos à nossa disposição a pressão apenas na superfície, medido por uma estação meteorológica, utilizamos a seguinte equação para obter a pressão nas alturas dos dados:

$$P_2 = P_1 \cdot \exp\left(-\frac{Alt_2 - Alt_1}{H}\right) \quad (2)$$

onde P_2 e P_1 são as pressões nos níveis de altitude Alt_1 e Alt_2 , e H é a altura de escala, que vale $H = R T / g$; sendo g a aceleração da gravidade (9.8 m/s^2), R a constante dos gases para o ar seco ($287 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$). Considerando $T = 298 \text{ K}$, obtemos $H = 8720 \text{ m}$.

Em seguida calculamos a densidade do ar entre cada dois níveis de pressão, cálculo este que é feito a partir da equação hidrostática dada a seguir:

$$\Delta P = -\rho g \Delta z \quad (3)$$

onde ΔP é a diferença de pressão em 2 níveis de altitude separados por Δz .

Calculamos então a razão dos sinais de vapor de água e do nitrogênio que, conforme explicado no primeiro relatório, é proporcional à razão de mistura do vapor de água na atmosfera, w , que por sua vez é a razão entre a massa de água e a massa de ar seco, por unidade de volume.

Cabe ressaltar que os dados do lidar são bastante ruidosos e por isso não é possível integrar até o topo da atmosfera. O sinal do nitrogênio e do vapor de água (sinais de espalhamento inelástico Raman) são muito fracos para grandes altitudes. Para evitar uma divisão por um número quase nulo, o algoritmo verifica se o sinal do nitrogênio é pelo menos 10 vezes maior que o desvio padrão de seu ruído de fundo, como já discutimos. Além disso, assumimos que o sinal do vapor de água é nulo acima da primeira altitude em que se torna negativo (como removemos o "background", o sinal irá eventualmente oscilar em torno de zero).

Feitas estas correções e obtidos estes resultados parciais, o PWV (não calibrado) é calculado integrando numericamente a equação (1). Por fim, a constante de calibração é obtida tomando a razão entre o PWV do lidar (não calibrado) e o PWV do GNSS (referência). Ou seja:

$$\text{constante de calibração} = \frac{PWV_{GNSS}}{PWV_{LIDAR}} \quad (4)$$

Da mesma maneira que o algoritmo para a calibração da sonda, utilizamos 1h de média para os dados do lidar e do GNSS, em torno do horário da sondagem (20h hora local). Este intervalo foi utilizado pois é o tempo típico que a sonda leva para atravessar a Troposfera. Não estava planejado e por isso não realizamos testes para determinar se uma média temporal menor modificaria os resultados da calibração com o GNSS (por exemplo, devido ao aumento do ruído do canal de vapor de água do lidar).

Os cálculos são repetidos para todas as noites em que temos simultaneamente dados do lidar e do GNSS. A próxima seção apresenta uma comparação e análise dos valores obtidos em ambas as calibrações.

3.3 Resultados

A partir da equação 2 foram calculados os perfis verticais de pressão atmosférica, partindo do valor da pressão em superfície para cada horário em que realizamos a calibração. Com a pressão em cada nível, foi então calculada a densidade da atmosfera, utilizando a equação hidrostática (Eq. 3). Um exemplo para o dia 27/08/2011 às 20h LT é mostrado na figura 2. Verifica-se que as equações utilizadas são adequadas, porque elas começam próximas de seus valores nominais na superfície ($P = 9,9845 \cdot 10^4 \text{ PA}$ $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$) e decaem exponencialmente com a altura, tal como esperado.

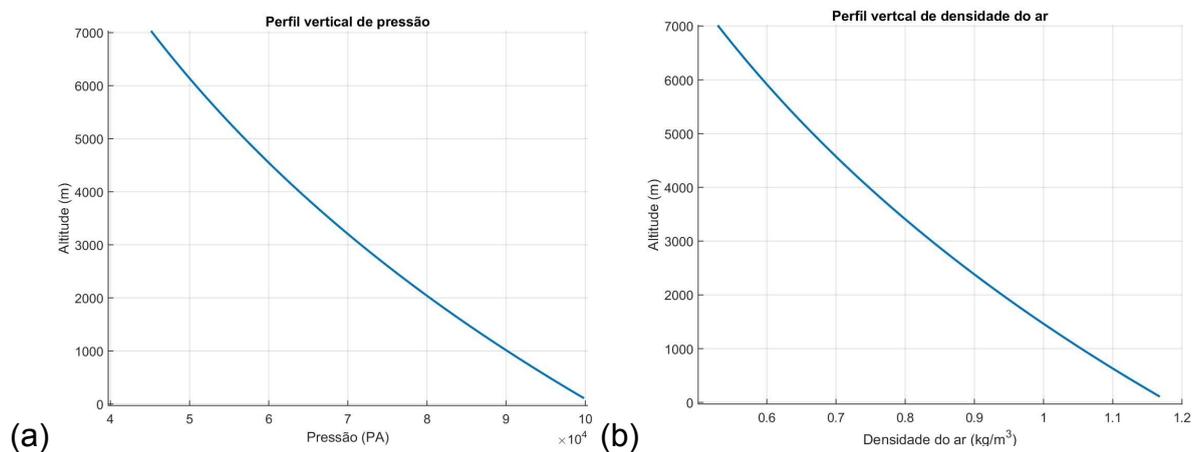


Figura 2: Perfis verticais de (a) Pressão atmosférica (b) Densidade do ar, calculados a partir das equações (2) e (3) para o dia para o dia 27/08/2011 às 20h LT para $P_s = 9,9845 \cdot 10^4 \text{ PA}$ e $T_s = 298\text{K}$.

Conforme explicado na seção 3.2, os valores de densidade do ar (Fig. 2b) foram utilizados para obter o valor do PWV_{lidar} , de acordo com a equação (1). Para isso, é necessário o valor da razão de mistura do vapor de água, que é obtido pela razão entre os canais $S_{\text{H}_2\text{O}}$ e S_{N_2} do lidar, como exemplificado na figura a seguir para o mesmo dia 27/08/2011 às 20h LT. O crescimento do sinal próximo da superfície (Fig. 3b) é devido à região de *overlap* nulo, já mencionada anteriormente, e não é considerada para a calibração.

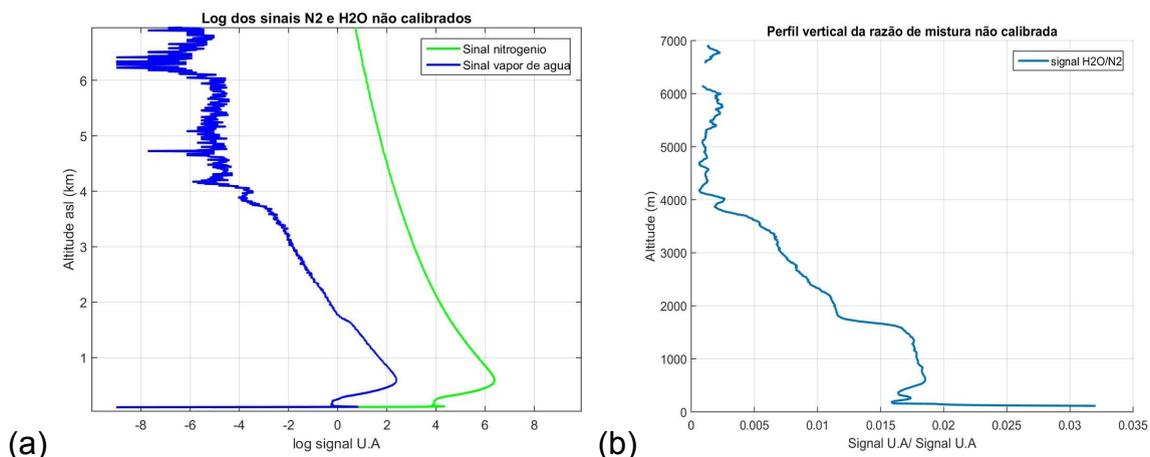


Figura 3: Perfis verticais (a) dos sinais do vapor de água (azul) e do nitrogênio (verde) medido pelo lidar em escala log, e (b) da razão entre eles.

As constantes de calibração foram então obtidas comparando o valor não calibrado de PWV_{lidar} com o valor de referência obtido pelo GNSS, de acordo com a equação (4). Na figura 4 é mostrado um perfil vertical do vapor de água do lidar já calibrado, sobreposto aos valores da radiossondagem.



Figura 4: Perfil vertical do sinal do Lidar de vapor de água calibrado e sobreposto aos valores da radiossonda.

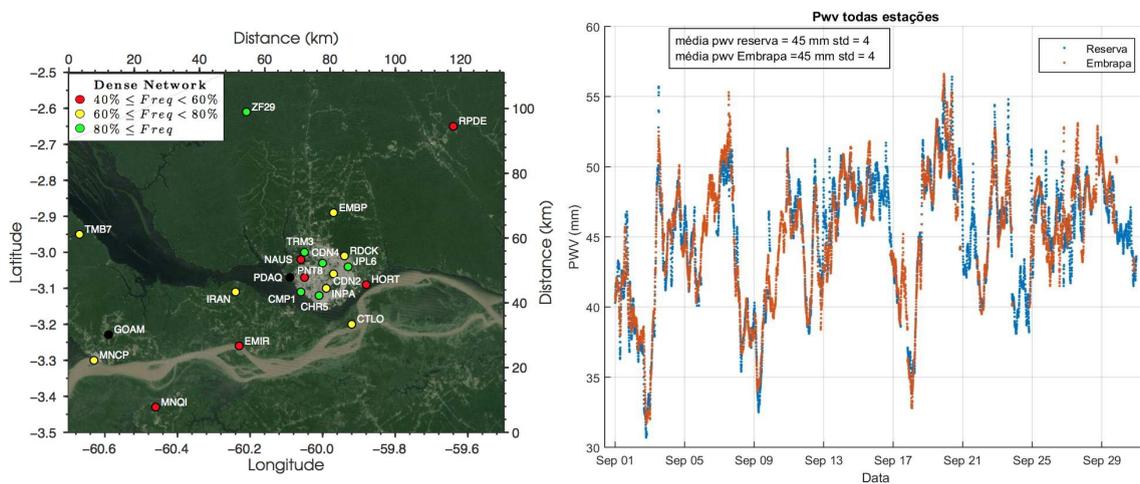


Figura 5: Esquerda: mapa das estações GNSS da rede densa que operou em Manaus entre 2011-2012. Direita: série temporal do PWV da Embrapa e Reserva Ducke, apenas no período em que as duas mediram simultaneamente. A cobertura temporal da Embrapa é de 25/04/2011 até 02/11/2011, e da Reserva Ducke, de 16/08/2011 a 05/04/2012.

Ressaltamos que realizamos a calibração com 2 conjuntos de dados de GNSS, um com os dados de PWV obtidos pela estação GNSS localizada na Embrapa (mesmo local do lidar), e a outra localizada na Reserva Ducke, a cerca de 5 km de distância. A necessidade surgiu, pois os dados de PWV da Embrapa só existiam até outubro de 2011, já os da Reserva Ducke iam até maio de 2012. No entanto, não houve radiossondagem no aeroporto

de Ponta Pelada a partir de fevereiro de 2012, portanto as comparações serão realizadas até janeiro. Destacamos que, devido à proximidade entre as estações GNSS, há uma diferença mínima entre o PWV das duas, conforme indica a figura (5).

As séries temporais das constantes de calibração são apresentadas na figura 6, e os critérios utilizados para determinar se uma calibração é boa ou ruim e se um dia tem neblina são os mesmos daqueles explicados na seção 3.1.

As calibrações feitas com o PWV da estação GNSS foram as que menos variaram. O desvio padrão para as calibrações a partir das sondagens ficou em $\sim 5.6\%$, a partir do GNSS da Embrapa ficou em $\sim 2.7\%$ e a partir do GNSS da reserva ficou em $\sim 6.4\%$. Os dados das médias e dos desvios padrões foram tomados, utilizando apenas as boas calibrações e em dias sem neblina. Notamos que o desvio padrão das constantes obtidas na reserva é maior do que o da Embrapa. Isso ocorreu devido a dois pontos próximos do início de novembro (ver Fig. 6), que foram calculados em dias com uma forte cobertura de nuvens médias. As nuvens atenuaram o sinal do lidar atrapalhando a integração da equação (1), mas não atrapalhando a calibração com a sondagem (que pode usar apenas os pontos abaixo da nuvem). Observamos também que os valores médios das constantes obtidas com o GNSS (831 e 828 g/kg) ficaram abaixo daquele obtido com a sondagem (846 g/kg).

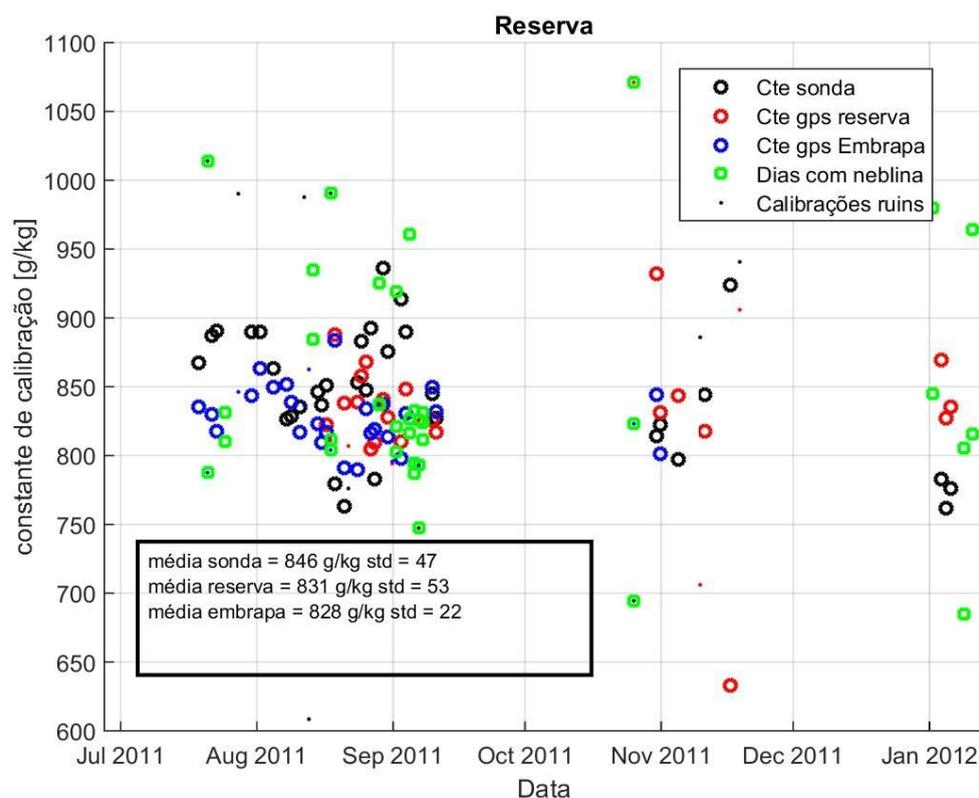


Figura 6: Constantes de calibração para o canal de vapor de água do Lidar obtidas a partir do PWV do GNSS (Embrapa e Ducke) e da razão de mistura da radiossonda.

Nota-se que os valores de PWV da sonda são sistematicamente maiores que os das estações GNSS, o que está relacionado com o lançamento da sondagem ser feito ao lado de rio. Apesar da diferença entre os valores médios de PWV (2 mm) não ser muito grande, as diferenças em dias específicos podem ser até 4 vezes maiores (de -2.5 a +8.5 mm). Portanto, faz sentido questionar se há uma relação entre a diferença nos valores de PWV e

a diferença nos valores de constante de calibração. Para estudar esse fator, foi feito o gráfico apresentado na figura 8.

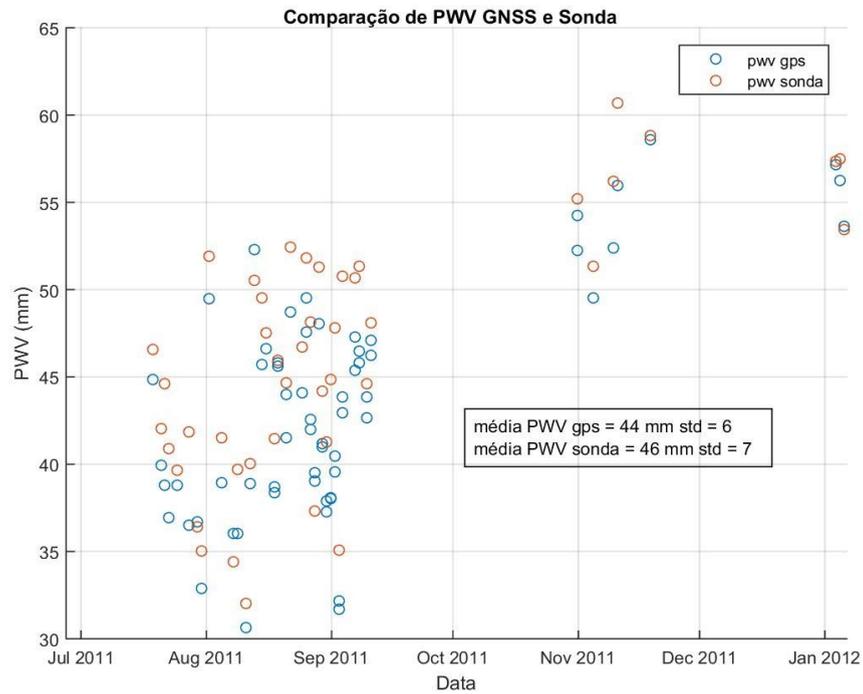


Figura 7: Séries temporais do PWV fornecidos pelas estações GNSS da Embrapa e da Reserva Ducke em sobreposição com os dados de pww da sonda.

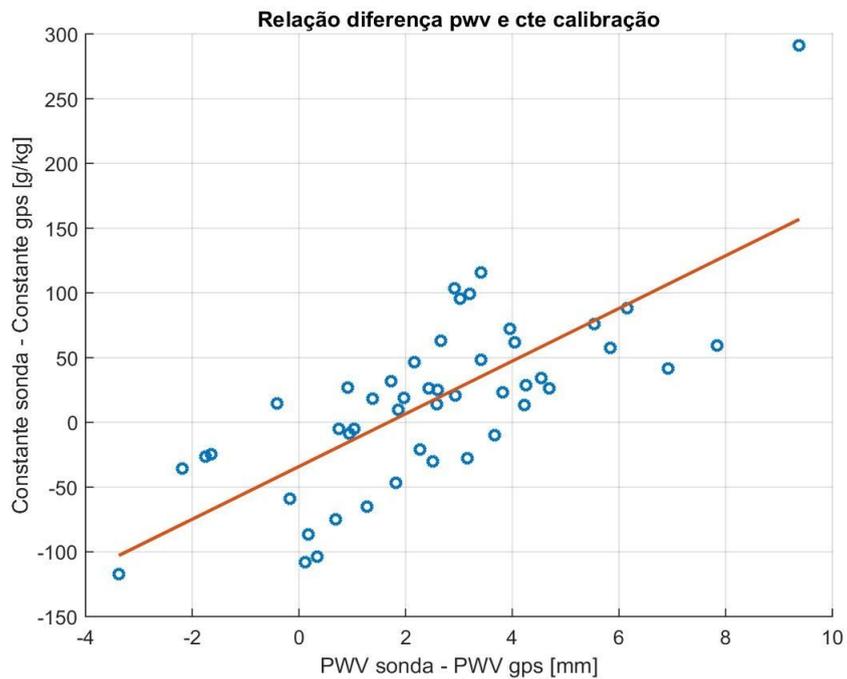


Figura 8: Ajuste linear entre as diferenças nos valores das constantes de calibração e PWV da sonda e das estações GNSS. Utilizou-se apenas os dias de calibrações boas e sem neblina.

Na figura 8 nota-se que há uma tendência nos dados, que faz com que quanto maior a diferença nos valores de PWV, maior serão as diferenças nos valores entre as constantes de calibração. Esta tendência explica a diferença entre as constantes de calibração obtidas com as sondagens e o GNSS. Entretanto, observamos que o coeficiente linear do ajuste não é compatível com 0 (-34 ± 10 g/kg), o que diz que quando os valores de PWV são iguais, as constantes de calibração devem apresentar uma diferença. Este valor talvez possa ser explicado pela diferença na distribuição vertical de vapor de água entre os dois sítios (lidar e sondagem), mas é algo que requer um estudo mais aprofundado.

4. Discussões e conclusão

Os dados do Lidar dependem diretamente das condições meteorológicas durante as medidas, porque nuvens baixas, neblina, fumaça de queimada e outros fatores atenuam fortemente seu sinal, tornando muito difícil de se extrair boas informações das calibrações nestes dias, além de serem muito sensíveis à quaisquer ajustes feitos no sistema. Por isso, implementamos alguns filtros que diferenciam calibrações consideradas boas e ruins. Os critérios que estabelecemos para caracterizar uma boa calibração é que a incerteza do coeficiente angular seja menor que 20% de seu valor absoluto, que o coeficiente linear seja compatível com zero dentro de 1 incerteza, que o coeficiente de determinação seja maior que 0,8 e que não haja neblina no dia em questão.

Para isso, tivemos que definir também um critério para verificar se um dia possui neblina, que é basicamente tomar a razão entre o valor máximo do sinal do Lidar até 3000m e até 250m e verificar se este valor é menor que 1, se sim, então consideramos que este dia tem neblina.

Tudo isso foi feito para que a classificação das calibrações dependesse o mínimo possível de análises visuais das figuras, pois este é um processo muito demorado e impreciso dado que depende da visão humana para identificar nuvens e anomalias nos ajustes. Ainda assim, foi mostrado que mesmo aplicando todos estes filtros nos dados, eles continuaram apresentando uma taxa de variação temporal como pode ser visto na figura 1b.

Por sua vez, as constantes de calibração obtidas a partir dos dados de PWV das estações GNSS da Embrapa e da reserva tendem a variar menos que as obtidas a partir com a radiossonda, porque estão situadas mais próximas do lidar, porém estão mais suscetíveis a erros em dias com nuvens, por conta da atenuação do sinal que impede a integração da razão de mistura em locais que ainda possuem vapor de água, fator este que dificulta fazer a diferenciação entre boas e ruins calibrações de maneira automatizada e que tornou o desvio padrão das constantes da reserva alto, conforme indica a figura 6.

5. Atividades complementares

Apesar de não fazer parte do cronograma, o bolsista cursou a disciplina Meteorologia Física 2 no IAG-USP que ele considera ter sido de grande importância para seu melhor entendimento das interações da luz com a atmosfera.

6. Cronograma

A tabela a seguir mostra o quanto foi cumprido de cada item do cronograma.

Atividade	Período	
Estudar a bibliografia	Mês 1 a 12	100%
Aprender a programar em Matlab ou Python e a trabalhar com os dados do lidar	Mês 1 a 3	100% mas é um aprendizado contínuo
Cursar a disciplina de meteorologia física 1 no IAG-USP	2º semestre/2019	100%
Implementar o algoritmo de calibração	Mês 4 a 6	100%
Processar 2 meses de cada ano com dados disponíveis	Mês 7 a 8	100%
Analisar a estabilidade da constante de calibração em diferentes situações (estações seca e chuvosa) + relatório de renovação	Mês 9 a 11	100%
Estudar a bibliografia, trabalhos de David et al. (2017) e Vérèmes et al (2019)	Mês 12 e 13	100%
Implementar o algoritmo de calibração baseado em PWV	Mês 14	100%
Processar os dados disponíveis (2011-2012)	Mês 15 e 16	100%
Comparar as novas constantes de calibração (pwv) com aquelas obtidas no primeiro ano (sondagens)	Mês 17	100%
Discussão dos resultados	Mês 18	100%
Relatório final	Mês 19	100%

7. Referências

- Adams, D. K., Henrique M. J. Barbosa, Karen Patricia Gaitan De Los Rios, 2017: A spatiotemporal water vapor/deep convection correlation metric derived from the Amazon Dense GNSS Meteorological Network. *Mon. Wea. Rev.*, 145, 279–288 doi:10.1175/MWR-D-16-0140.1
- Adams, D. K., et al., 2015: The Amazon Dense GNSS Meteorological Network: A New Approach for Examining Water Vapor and Deep Convection Interactions in the Tropics. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, doi:10.1175/BAMS-D-13-00171.1.
- David, L., Bock, O., Thom, C., Bosser, P., and Pelon, J.: Study and mitigation of calibration factor instabilities in a water vapor Raman lidar, *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 2745–2758, 2017.
- Ferrare, R. A., Melfi, S. H., Whiteman, D. N., Evans, K. D., Schmidlin, F. J., and Starr, D. O.: A Comparison of Water Vapor Measurements Made by Raman Lidar and Radiosondes, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 12, 1177–1195, 1995.

- Foth, A., Baars, H., Di Girolamo, P., and Pospichal, B.: Water vapour profiles from Raman lidar automatically calibrated by microwave radiometer data during HOPE, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 7753–7763, 2015.
- Han, Y., Snider, J. B., Westwater, E. R., Melfi, S. H., and Ferrare, R. A.: Observations of water vapor by ground-based microwave radiometers and Raman lidar, *J. Geophys. Res.*, 99, 695–702, 1994.
- Sapucci, L. F., et al., 2007: Intercomparison of integrated water vapor estimates from multisensors in the Amazonian region. *J. Atmos. Oc. Tech.*, 24, 1880–1894.
- Vérèmes, H.; Payen, G.; Keckhut, P.; Duflot, V.; Baray, J.-L.; Cammas, J.-P.; Evan, S.; Posny, F.; Körner, S.; Bosser, P. Validation of the Water Vapor Profiles of the Raman Lidar at the Maïdo Observatory (Reunion Island) Calibrated with Global Navigation Satellite System Integrated Water Vapor. *Atmosphere* 2019, 10, 713.
- Whiteman, D. N., Melfi, S. H., and Ferrare, R. A.: Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere, *Appl. Opt.*, 31, 3068–3082, 1992.